

Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées

C. Doré, F. Varoquaux, coordinateurs



Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées

C. Doré, F. Varoquaux, coordinateurs

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
147, rue de l'Université, 75007 Paris

Collection *Savoir-faire*

Analyse du génome et gestion des ressources génétiques forestières,
D. Prat, P. Faivre Rampant et E. Prado,
2006, 484 p.

Acteurs et territoires locaux. Vers une géoagronomie de l'aménagement,
M. Benoît, J.-P. Deffontaines et S. Lardon, coord.,
2006, 176 p.

« Il est à désirer pour l'agriculture que l'on s'occupe
de croisements dans plusieurs genres
de la famille des Graminées ».

(H. Lecoq, 1862. *De la fécondation naturelle
et artificielle des végétaux et de l'hybridation*.
Librairie agricole de la Maison rustique,
Paris, 425 p.)

Préface

L'ouvrage intitulé *Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées* est riche en informations. Il est constitué de cinquante fiches décrivant l'amélioration génétique de plantes cultivées importantes, en milieu tempéré principalement. Se voulant à la portée des nombreux acteurs concernés par l'agronomie et l'amélioration génétique des espèces cultivées dans des milieux tempérés et de quelques espèces des milieux tropicaux, il est conçu pour des généralistes. Néanmoins des lecteurs avertis, tels que les enseignants en biologie, découvriront avec profit les acquis et les tendances en ce domaine.

Cet ouvrage met en exergue la forte liaison entre l'évolution des technologies et les progrès de la connaissance scientifique. En cela, il milite pour le développement de recherches d'amont, démontrant que celles-ci débouchent sur de nouvelles possibilités facilitant, accélérant ou maîtrisant l'amélioration génétique des espèces végétales. Il faut, par exemple, se rappeler que c'est une découverte très fondamentale, celle de la reproduction sexuée des végétaux, qui est à l'origine du développement considérable depuis plus d'un siècle, de la sélection végétale.

Il montre aussi que la sélection végétale a su utiliser les progrès de la physiologie, de la biologie, de la statistique en les intégrant dans une stratégie d'amélioration adaptée à chaque espèce, élargissant ainsi la gamme des nouvelles créations.

Deux points forts ressortent de cet ouvrage richement documenté :

- la préservation des potentialités de diversification des espèces, la caractérisation et la conservation des ressources génétiques sont prioritaires. Les techniques utilisées en amélioration des plantes ont permis au cours du temps d'accroître cette diversification, de mieux la caractériser et d'améliorer les conditions de conservation des ressources ;
- au cours des cinquante dernières années, quelle que soit l'espèce, les objectifs et les critères de sélection se sont diversifiés. La réponse à de nouveaux critères est rendue possible à la fois par le maintien de la variabilité génétique et par les techniques qui permettent de la créer et de la mettre durablement à disposition de l'agriculture sous la forme de nouvelles variétés.

Cet ouvrage, par sa qualité pédagogique, offre une vision claire et objective des méthodes utilisées en amélioration des plantes ces dernières années.

Paul VIALLE
Président du Comité technique
permanent de la sélection

Remerciements

En 2001, sur proposition du comité scientifique du Comité technique permanent de la sélection végétale (CTPS), le Bureau des semences du ministère de l'Agriculture a alloué une subvention destinée à financer une enquête et la réalisation d'un document retraçant l'histoire des techniques utilisées en amélioration des plantes et en création variétale.

Après avoir pris connaissance du document, le comité scientifique du CTPS, l'a commenté et amélioré. Il a souhaité qu'il soit publié en un ouvrage à destination d'un public averti.

Que tous ceux qui ont permis cette réalisation soient ici remerciés :

- le Bureau des Semences du ministère de l'Agriculture, l'Institut national de la recherche agronomique et particulièrement le département de Génétique et Amélioration des Plantes, le Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences (GEVES), le Groupement national interprofessionnel des semences (GNIS), la Sica Syndicat des obtenteurs de variétés végétales (SICASOV), l'université de Perpignan, les Éditions INRA, qui ont chacun, à un titre ou à un autre, contribué au financement et à la logistique ;
- le comité de pilotage pour l'enquête et sa publication sous forme d'ouvrage, composé d'Yvette Dattée (GEVES), de Philippe Gracien (GNIS), de Georges Pelletier (INRA) et de Jean-Noël Plagès (Limagrain) ;
- André Charrier (INRA/Agro M), Yvette Dattée (GEVES), Claire Doré (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Martine Franck (GEVES), André Gallais (INRA/INA PG), Georges Pelletier (INRA), Jean-Noël Plagès (Limagrain), Fabrice Varoquaux (GNIS) pour leur participation à la rédaction de la première partie et des annexes ;
- Raymonde Bouldard (INRA Éditions) pour la préparation du manuscrit et la correction des épreuves, Joëlle Veltz (INRA Éditions) pour la conception des planches couleur et Nathalie Broux (DESK) pour le traitement typographique du texte ;
- les personnes citées ci-dessous, espèce par espèce, qui ont participé directement à l'élaboration des fiches entre 2001 et 2004, ainsi que Joël Guiard (GEVES) et Marianne Lefort (INRA) pour l'harmonisation des fiches.

L'abricotier : Jean-Marc Audergon (INRA), Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M).

L'artichaut : Ellen Bouty (GEVES), Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Jean Corre (INRA), Magalie Delalande (INRA), Claude Foury (INRA-ENSH, retraité), Pierre Pécaut (INRA, retraité), Chrystelle Jouy-Mondière (GEVES).

L'asperge : François Boulineau* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Catherine Delaitre (Darbonne), Claire Doré (INRA), Catherine Rameau (INRA), Jean-Michel Retaillieu (GEVES), Gérard Simon (Vilmorin).

Le bananier : Frédéric Bakry (CIRAD).

La betterave sucrière et la betterave fourragère : Karine Bounan (Florimond Desprez Veuve & Fils), Dominique Bruandet (SNFS), Bruno Desprez (Florimond Desprez Veuve & Fils), Michel Desprez (Florimond Desprez Veuve & Fils), Jean Dujardin (Vilmorin, retraité), Jacques Fauchère (ITB), Jean-Marie Guillet (Lions Seeds), Bruno Richard* (GEVES), Marc Richard-Molard (ITB), Bertrand Schweisguth (INRA, retraité), Klaas van der Woude (VanderHave Sugar Beet Seed Bv).

Le blé tendre : Michel Baron (Limagrain), Patrick Bastergue (GEVES), Gérard Branlard (INRA), Yvonne Cauderon (INRA, retraitée), Joël Guiard (GEVES), Joseph Jahier (INRA), Philippe Lonnet (Florimond Desprez Veuve & Fils), Christian Quandalle (consultant), Thierry Ronsin (Limagrain), Michel Rousset (INRA), Frank Triverio (Monsanto), Maxime Trottet (INRA).

Les caféiers : Pierre Charmetant (CIRAD), André Charrier (INRA/Agro M), Charles Lambot (Nestlé), Vincent Pétiard (Nestlé), Jean-Nicolas Wintgens (consultant indépendant).

La carotte : François Boulineau (GEVES), Mathilde Briard (INH), Philippe Buret (Clause, retraité), Michel Chauvet (INRA), Jean-Noël Plagès (Limagrain), Simon Gérard (Vilmorin).

Le cassissier : Jean-Michel Boré (INRA), Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Michel Edin (CTIFL), Yves Lespinasse (INRA).

La chicorée endive ou witloof : Hubert Bannerot (INRA, retraité), Michel Chauvet (INRA), Jean-Marie Constant (FNPE), Claire Doré (INRA), Guy Fouilloux (INRA), Emmanuel Leclaire (Momont et Fils), Alain Lecompte (Vilmorin), Jean-François Morot-Gaudry (INRA), Jean-Michel Retaillieu (GEVES).

La chicorée industrielle : Louis Delesalle (Florimond Desprez Veuve & Fils), Bruno Desprez (Florimond Desprez Veuve & Fils), Bernard Masseret (Nestlé), Vincent Pétiard (Nestlé), Jean-Michel Retaillieu (GEVES), Bruno Richard (GEVES).

* Secrétaire technique d'une des sections du CTPS.

Le chou : Pascal Bidard (GEVES), François Boulineau* (GEVES), Jean-Marie Boussac (Clause Tézier), Valérie Cadot (GEVES), Véronique Chable (INRA), Michel Chauvet (INRA), Amand Chesnel (Vilmorin), Frédéric Dalmon (Graines Gautier), Yves Hervé (INRA-ENSAR, retraité), Chrystelle Jouy-Mondière (GEVES), Claude Laviec (OBS), Christophe Le Duff (GEVES), Jean-Pierre Le Saint (CERAFEL), Rémi Levieil (Clause Tézier), Paul Merckling (SUAD-Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin), Jean-Noël Plagès (Limagrain), Robert Prieur (Clause Tézier), Grégoire Thomas (Agrocampus, Rennes).

Le colza : Michel Baron (Limagrain), Françoise Blouet* (GEVES), Hortense Brun (INRA), Anne-Marie Chèvre (INRA), Régine Delourme (INRA), Marie-Aude Demoury (Syngenta Seeds France), Jean-Pierre Despeghel (Monsanto), Nathalie Nesi (INRA), Georges Pelletier (INRA), Catherine Primard (Agri Obtentions), Thieu Pustjens (Advanta Seeds Bv), Michel Renard (INRA), Thierry Ronsin (Limagrain), Daniel Segonds (RAGT R2n), Ginette Séguin-Swartz (Agriculture et Agroalimentaire Canada), Georges Vermeersch (Sofiproteol).

Le dactyle pelotonné : Pierre Baudouin (GIE Grass), Bernard Bayle (DLF Trifolium), Vincent Gensollen* (GEVES), Marc Ghesquière (INRA), Christian Huyghe (INRA), Claude Mousset (INRA).

La fêtuque élevée : Bernard Bayle (DLF Trifolium), Bernard Bourgoin (INRA, retraité), François Charpentier (GIE Rega, retraité), Jean-François Chosson (R2n), Vincent Gensollen* (GEVES), Marc Ghesquière (INRA), Christian Huyghe (INRA), Aline Robert (R2n).

La féverole : Michel Chauvet (INRA), Gérard Duc (INRA), Robert Esnault (INRA), Vincent Gensollen* (GEVES), Joël Le Guen (INRA), Pascal Marget (INRA).

Le forsythia : Richard Brand (GEVES), Alain Cadic (INRA).

Le fraisier : François Boulineau* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Catherine Delaitre (Darbonne), Béatrice Denoyes-Rothan (INRA), Jean-Claude Navatel (CTIFL), Jean-Michel Retailleau (GEVES), Georgette Risser (INRA, retraitée), Philippe Roudeillac (CIREF).

Le haricot : Guy Fouilloux (INRA), Bernard Bosc (Vilmorin), François Boulineau* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Rozenn Diancourt (Clause Tézier), Jacques Hallard (Hortisem, retraité), Bernard Kol (Graines Gautier), Jacques Poissonnier (CTIFL-AIREL).

L'hévéa ou arbre à caoutchouc : André Clément-Demange (CIRAD), Yvette Dattée (GEVES).

L'hortensia : Hélène Bertrand (INH), Richard Brand (GEVES), Claudie Lambert (INH).

* Secrétaire technique d'une des sections du CTPS.

La laitue : Richard Brand (GEVES), François Boulineau* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Henri de Fontanges (GEVES), Jacques Gautier (Graines Gautier), Brigitte Maisonneuve (INRA), Jean-Noël Plagès (Limagrain).

Le lin : Claire Doré (INRA), Guy Fouilloux (INRA), Philippe Le Coënt* (GEVES), Philippe Morin (ITL), Jean-Jacques Schott (GEVES), Claude Sultana (ITL, retraité), Reynald Tavernier (Linéa Semences de lin), Jean-Paul Trouvé (Terre de lin).

La luzerne : Bernard Bayle (DLF Trifolium), Pierre Baudouin (GIE Grass), François Charpentier (GIE Rega, retraité), Christian Huyghe (INRA), Vincent Gensollen* (GEVES), Philippe Lonnet (Florimond Desprez Veuve & Fils).

Le maïs : Bernard Aizac* (GEVES), Yves Barrière (INRA), Philippe Bertaux (Limagrain), André Cauderon (INRA, retraité), Alain Charcosset (INRA), Pierre Desbons (Pioneer Hi-bred), Antoine Gaillard (Maisadour Semences), André Gallais (INRA-INA PG), Maryse Lafouasse (Pioneer Hi-Bred), Bruno Lefèvre (RAGT), Josiane Lorgeou (Arvalis-Institut du Végétal), Alain Murigneux (Biogemma), Alain Taillardat (Advanta France).

Le melon : Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Jean-Paul Ginoux (ASL Laboratoire de Recherche/ Bio-Obtentions), Frank de Langen (Clause Tézier), Jean-Michel Meunier (Sakata Seed), Michel Pitrat (INRA), Jacques Hallard (Hortisem, retraité).

Le merisier : Isabelle Bilger (CEMAGREF), Jean Dufour (INRA), Alice Gauthier (IDF), Bernard Héois* (CEMAGREF), Michel Lenoir (Vilmorin Graines d'Arbres, retraité), Stéphanie Mariette (CEMAGREF), Frédérique Santi (INRA), Daniel Terrasson (CEMAGREF).

Le noisetier : Richard Brand* (GEVES), Henri Breisch (CTIFL), Michel Chauvet (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Eric Germain (INRA, retraité), Jean-Paul Sarraquigne (ANPN), Henri de Taffin (CTIFL).

Le noyer : Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Eric Germain (INRA, retraité), Jean-Pierre Prunet (CTIFL).

L'oignon : François Boulineau* (GEVES), Richard Brand (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Amand Chesnel (Vilmorin), Claude Foury (INRA-ENSH, retraité), Rémi Kahane (CIRAD), Charles-Marie Messiaen (INRA, retraité), Bertrand Schweisguth (INRA, retraité), Guy Seisson (GEVES).

L'orge : Patrick Bastergue* (GEVES), André Cauderon (INRA, retraité), Louis Jestin (INRA), Jacques Legouis (INRA), Michel Madre (SECOBRA Recherches).

Le pêcher : Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Jacques Claverie (INRA), Elisabeth Dirlewanger (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Jocelyne Kervella (INRA), Arsène Maillard (Euro Pépinières), Annick Moing

* Secrétaire technique d'une des sections du CTPS.

(INRA), René Monet (INRA, retraité), Thierry Pascal (INRA), Daniel Plenet (INRA), Raymond Saunier (INRA, retraité).

Les peupliers : Christian Ginisty (CEMAGREF), Bernard Héois* (CEMAGREF), Lise Jouanin (INRA), Daniel Terrasson (CEMAGREF), Marc Villar (INRA et président du GIS Peuplier de mars 2001 à mars 2003).

Le piment commun : Richard Brand (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Anne-Marie Daubèze (INRA), Frédéric Denet (Clause Tézier), Françoise Jourdan (GEVES), Jean-Michel Meunier (Sakata Seed), Alain Palloix (INRA).

Le pin maritime : Bernard Héois* (CEMAGREF), Patrick Pastuszka (INRA), Annie Raffin (INRA), Daniel Terrasson (CEMAGREF).

Le poirier et ses porte-greffe poirier et cognassier : Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Élisabeth Chevreau (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Marcel Le Lezec (INRA), Yves Lespinnasse (INRA), Marie-Hélène Simard (INRA).

Le pois : Alain Baranger (INRA), Alain Burghoffer (INRA), Bernard Bosc (Vilmorin), François Boulineau* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Roger Cousin (INRA, retraité), Gérard Duc (INRA), Gérard Etévé (INRA), Henry de Fontanges (GEVES), Vincent Gensollen* (GEVES), Jean-François Herbonomez (Momont et Fils), Philippe Lonnet (Florimond Desprez Veuve & Fils), Patrick Michaud (GEVES), Catherine Rameau (INRA).

La pomme de terre : Frédérique Aourousseau (Comité Nord), Eric Bonnel (Germicopa), Laura Chauvin (INRA), Daniel Ellissèche* (INRA), Françoise Rousselle-Bourgeois (INRA).

Le pommier et ses porte-greffe : Jean-Michel Boré (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Élisabeth Chevreau (INRA), François Laurens (INRA), Yves Lespinnasse (INRA), Marie-Hélène Simard (INRA).

Les porte-greffe de Prunus : Richard Brand* (GEVES), Michel Chauvet (INRA), Jacques Claverie (INRA), Françoise Dosba (INRA/Agro M), Marc Kleinhentz (INRA), Jean-Luc Poëssel (INRA), Raymond Saunier (INRA, retraité), Anne Zanetto (INRA).

Le Pyracantha : Richard Brand (GEVES), Alain Cadic (INRA).

Les ray-grass : François Balfourier (INRA), Pierre Baudouin (GIE Grass), Bernard Bayle (DLF Trifolium), François Charpentier (GIE Rega, retraité), Jean Dujardin (Vilmorin, retraité), Vincent Gensollen* (GEVES), Marie-Christine Gras (R2n), Christian Huyghe (INRA), Anne Viguié (GIE Rega).

Le soja : Vincent Cellier* (GEVES), Richard Forest (RAGT), Vincent Joubert (GEVES), Pierre Roumet (INRA).

La tomate : Georges Ano (INRA), Richard Brand (GEVES), Mathilde Causse (INRA), Michel Chauvet (INRA), René Damidaux (INRA), Henri Laterrot (INRA,

* Secrétaire technique d'une des sections du CTPS.

retraité), Jacqueline Philouze (INRA, retraitée), Jean-Noël Plagès (Limagrain), Patrick Rousselle (INRA).

Le tournesol : André Bervillé (INRA), Yvonne Cauderon (INRA retraitée), Vincent Cellier* (GEVES), Claire Etineau (Syngenta Seeds France), Philippe Jouve (Monsanto), Felicity Vear (INRA), Georges Vermeersch (Sofiprotéol).

Le trèfle violet : Jean-François Chosson (R2n), Vincent Gensollen* (GEVES), Christian Huyghe (INRA), Claire Mousset-Declas (INRA), Aline Robert (R2n).

Le triticale : Patrick Bastergue* (GEVES), Michel Bernard (INRA), Annaig Bouguennec (INRA), Yvonne Cauderon (INRA, retraitée), Louis Jestin (INRA), Jean-Paul Le Goff (RAGT), Philippe Lonnet (Florimond Desprez Veuve & Fils).

La tulipe : Alain Cadic (INRA), Marie-Hélène Gandelin* (GEVES), Alain Mével (INH), Marcel Le Nard (INRA, retraité), Robert Turc (Ernest Turc Oignons à fleurs).

La vigne et ses porte-greffe : Michel Boulay (Société Moët & Chandon), Alain Bouquet (INRA), Jean-Michel Boursiquot (ENTAV), Christophe Schneider* (INRA).

Le Weigela : François Boulineau (GEVES), Alain Cadic (INRA).

Sommaire

Avant-propos	17
Première partie. Principes et méthodes de génétique et d'amélioration des plantes	19
La génétique des plantes	21
Les systèmes de reproduction des plantes	24
Les principes de l'amélioration des plantes	30
Méthodes pour augmenter la variabilité génétique	39
Méthodes facilitant ou accélérant la création variétale	46
Pour en savoir plus	50
Deuxième partie. Présentation de cinquante plantes cultivées..	53
Guide du lecteur	55
L'abricotier	61
L'artichaut	71
L'asperge	85
Le bananier	97
La betterave sucrière et la betterave fourragère	115
Le blé tendre	137
Les caféiers	163
La carotte	183
Le cassissier	199
La chicorée endive ou witloof	207
La chicorée industrielle	219
Le chou	229
Le colza	255
Le dactyle pelotonné	281
La fétuque élevée	291
La féverole	301
Le forsythia	313
Le fraisier	319

Le haricot	335
L'hévéa ou arbre à caoutchouc	349
L'hortensia	361
La laitue	369
Le lin	383
La luzerne.....	397
Le maïs.....	409
Le melon	435
Le merisier	451
Le noisetier	461
Le noyer	469
L'oignon	481
L'orge	495
Le pêcher	515
Les peupliers	533
Le piment commun	543
Le pin maritime.....	557
Le poirier et ses porte-greffe poirier et cognassier	571
Le pois	585
La pomme de terre	605
Le pommier et ses porte-greffe	621
Les porte-greffe de <i>Prunus</i>	639
Le <i>Pyracantha</i>	653
Les ray-grass	659
Le soja.....	677
La tomate	691
Le tournesol	711
Le trèfle violet	729
Le triticales	737
La tulipe	749
La vigne et ses porte-greffe	759
Le <i>Weigela</i>	781
Conclusion	787
Glossaire	791
Abréviations, acronymes et sigles	797
Index des noms latins des plantes	805
Index des noms des micro-organismes et déprédateurs	809

Avant-propos

Cet ouvrage est le résultat de la consultation et de la collaboration de plus de 200 spécialistes du secteur public et du secteur privé. Destiné à un large public, il est composé de deux parties.

Une première partie rappelle les principes et méthodes de génétique et d'amélioration des plantes en donnant les éléments nécessaires à la compréhension des bases de la génétique, des modes de reproduction des espèces végétales, puis les principes généraux de l'amélioration des plantes. Les deux derniers chapitres traitent des méthodes employées pour augmenter la variabilité génétique et faciliter la création variétale en partant des méthodes les plus anciennes et déjà largement éprouvées pour décrire ensuite les plus récentes, dérivées des progrès de la biologie moléculaire.

La seconde partie, très documentée, est constituée de cinquante fiches de présentation de plantes cultivées, soit quatre céréales, six plantes oléo-protéagineuses, trois industrielles, trois forestières, cinq fourragères, huit fruitières, douze légumières, cinq ornementales, trois exemples d'espèces cultivées en milieu tropical et la vigne.

Toutes les fiches sont construites selon un même plan et un guide du lecteur en facilite l'utilisation, chacun pouvant ainsi localiser rapidement les informations recherchées.

Pour chaque plante présentée, une synthèse est fournie sur l'histoire de l'espèce et les innovations marquantes en matière de création variétale. Cette synthèse retrace les principales étapes qui ont marqué l'amélioration génétique en même temps qu'elle apporte des éléments sur les perspectives à envisager. Elle fait également état de données sur l'inscription et la protection des variétés.

Des illustrations de la plante entière et des produits de la récolte sont associées aux textes.

Un glossaire, un index par espèce ainsi que la liste des abréviations, sigles et acronymes employés figurent à la fin de l'ouvrage.

Cet ouvrage, qui n'a pas la vocation d'apporter des faits nouveaux ou inédits, a pour but de rassembler et de mettre à disposition des résultats utiles à la connaissance des espèces cultivées et de leur diversité.

Partie I

Principes et méthodes de génétique et d'amélioration des plantes

Pour mieux comprendre les possibilités et les contraintes de l'amélioration des espèces végétales et de la création de variétés, suivant leur mode de reproduction, il est bon de revenir brièvement sur les notions élémentaires de génétique et d'amélioration des plantes, et le vocabulaire qui leur est associé.

La génétique des plantes

Le matériel héréditaire des plantes est constitué d'acide désoxyribonucléique (ADN), organisé en chromosomes inclus dans le noyau de chacune des cellules de l'individu. Il y a également dans le cytoplasme de celles-ci des molécules d'ADN contenues dans les plastes et les mitochondries qui représentent moins de 1 % du total du matériel héréditaire. Ces organites cellulaires sont le siège, en particulier, de deux fonctions physiologiques de base des plantes, respectivement la photosynthèse et la respiration.

Tout caractère héréditaire dépend, *in fine*, de l'activité d'unités réparties sur la molécule d'ADN auxquelles on a (ré)attribué le nom de gènes. Le mot « gène » fut introduit en 1909 par W. Johanssen, sélectionneur danois, pour désigner les hypothétiques déterminants élémentaires de l'hérédité. Chaque gène est donc constitué de quelques centaines à plusieurs milliers de nucléotides, les éléments constitutifs de l'ADN et « code » une protéine particulière ou un acide ribonucléique (ARN) qui intervient dans un processus donné de la « vie » cellulaire et, par voie de conséquence, de l'individu.

Chaque gène occupe en principe une position définie sur un chromosome, à tel point qu'on peut établir des « cartes » génétiques précises de ces chromosomes. Cette position est appelée « locus ». À un locus particulier, sur un chromosome donné, le même gène présente chez l'espèce considérée dans son ensemble, plusieurs variantes, dues aux mutations accumulées et retenues au cours de son évolution. Ces formes variantes sont appelées les différents « allèles » du gène en question.

Le génome d'une espèce végétale contient environ 30 000 gènes. Un nombre moyen d'allèles par locus de l'ordre de 10 n'est pas rare. Si l'on peut calculer le nombre de combinaisons possibles (10 élevé à la puissance 30 000), il est impossible de se le représenter !

Le nombre de chromosomes des cellules somatiques d'un individu (symbolisé par le paramètre $2n$) varie considérablement d'une espèce à l'autre. Il est toujours un multiple d'un nombre x , dit de base, variable avec l'espèce : chaque lot de x chromosomes contient (en principe) l'ensemble des gènes de l'espèce. Chez bon nombre d'entre elles, les cellules de l'individu contiennent $2n = 2x$ chromosomes.

On dit qu'elles sont diploïdes. Mais, il n'est pas rare, chez les plantes cultivées en particulier, qu'une espèce possède trois exemplaires du nombre de base ($2n = 3x$, elle est triploïde, cas du bananier) ou quatre ($2n = 4x$, elle est tétraploïde, cas de la pomme de terre ou de la luzerne), ou plus encore ($2n = kx$, polyploïde, cas de la canne à sucre). De telles espèces sont dites autopolyploïdes et les chromosomes portant un même ensemble de gènes sont dits « homologues ».

Le croisement spontané entre espèces végétales différentes est bien plus fréquent que dans le règne animal. Il est à l'origine de certaines espèces cultivées comme le bananier, les blés, le caféier arabica, le colza, la fétuque, le fraisier, la laitue, le peuplier, le triticale, ... La structure des génomes de ces espèces se trouve donc compliquée par l'addition de génomes préexistants. Ainsi, le génome du blé tendre est-il l'addition, par l'intermédiaire de deux hybridations successives, des génomes diploïdes ($x = 7$) de trois espèces différentes. Le blé tendre est donc un « allo-hexaploïde » qui comporte 42 chromosomes. De telles espèces sont dites allopolyploïdes et les chromosomes portant un ensemble voisin de gènes sont dits « homéologues ».

Les plantes se développent suivant un processus permanent de différenciation à partir de cellules produites par les méristèmes végétatifs situés dans les bourgeons des tiges feuillées (méristèmes caulinaires ou apicaux) ou à l'extrémité des racines (méristèmes racinaires). C'est dans ces méristèmes qu'a lieu l'essentiel des mitoses, divisions cellulaires où chacune des deux cellules filles reçoit une copie exacte de l'équipement chromosomique de la cellule mère : toutes les cellules qui dérivent les unes des autres par des mitoses sont génétiquement identiques.

Le méristème végétatif, situé à l'extrémité des tiges, peut évoluer en un méristème floral qui donne naissance à une fleur. La fleur comporte des sépales, des pétales (ces derniers sont souvent colorés) et les organes de la reproduction sexuée. Du côté mâle, il s'agit des étamines qui contiennent le pollen. Le pistil est l'organe femelle, constitué notamment du ou des carpelle(s) où est(sont) logé(s) l'(es) ovule(s) qui contient(nent) les cellules reproductrices. La figure 1 et la planche couleur 1 illustrent et récapitulent les différentes étapes du cycle de la reproduction sexuée qui sera détaillé page 24 : méiose, double fécondation, développement, croissance et formation des organes reproducteurs.

Les gamètes mâles et femelles à l'origine de l'embryon contiennent le même nombre de chromosomes, par conséquent n (ils sont haploïdes), ce qui permet de revenir après fécondation à un individu à $2n$ chromosomes. Le passage de $2n$ chromosomes à n chromosomes, préalable à la formation des gamètes, se réalise dans les organes sexuels au cours de la méiose, ensemble de deux divisions, dont la première est remarquable par l'appariement des chromosomes homologues, et par l'échange de segments de ces chromosomes (recombinaison par *crossing-over*).

La reproduction sexuée se réalise par la fécondation d'un gamète femelle (l'oosphère) par un gamète mâle (un anthérozoïde porté par le pollen) donnant

un œuf ou zygote à $2n$ chromosomes. Cette fécondation peut se faire entre gamètes produits par le même individu (autogamie) ou par deux individus différents (allogamie). Chez les Angiospermes, un processus particulier de « double fécondation » produit non seulement un œuf mais également une cellule à $3n$ chromosomes par la rencontre d'un deuxième anthérozoïde porté par le pollen et d'une cellule gamétique femelle possédant $2n$ chromosomes. L'œuf se développe en embryon, tandis que la cellule triploïde est à l'origine de l'albumen. Ce dernier a un rôle nourricier pour l'embryon et constitue, par exemple, l'essentiel du grain des céréales. L'embryon se développe dans la graine en formation pour donner un individu rudimentaire, la plantule qui émerge lors de la germination de la graine.

Si les paires de chromosomes homologues portent des allèles différents à un certain nombre (L) de locus, on dit que l'individu est hétérozygote. Si les allèles sont identiques, on dit qu'il est homozygote. Au cours de la méiose d'un individu diploïde (cas le plus simple), hétérozygote pour L locus, les allèles différents se répartissent entre les gamètes de sorte que le nombre de gamètes différents sera 2^L élevé à la puissance L . Pour $L = 10$ (ce qui est très peu), il y a donc 1 024 gamètes différents et après (auto) fécondation, 59 049 types d'individus différents (3^L élevé à la puissance 10, puisque chaque locus sera, soit hétérozygote, soit homozygote, pour l'un ou l'autre des allèles). On parle de génotype pour définir l'assortiment d'allèles d'un individu. Tous ces génotypes ne sont pas également probables. En effet et en particulier, pour un locus donné, hétérozygote porteur des allèles A et a , il y aura dans cette descendance deux fois plus d'individus eux-mêmes hétérozygotes (Aa) pour ce locus, que d'homozygotes AA ou que d'homozygotes aa . Cependant, en moyenne, le nombre de locus hétérozygotes dans cette première génération sera de 5 au lieu de 10 chez le parent. Dès 1865, G. Mendel démontra ainsi qu'une succession d'autofécondations conduit à la disparition progressive de l'hétérozygotie et produit ce que l'on appelle des lignées pures où les chromosomes homologues sont identiques. Une lignée pure donne en descendance, par autofécondation, des individus identiques à elle-même et identiques entre eux. On aboutit ainsi à la fixation de tous les caractères.

A contrario, le croisement entre deux lignées pures non apparentées de la même espèce va produire un ensemble d'individus, identiques entre eux, mais différents des deux parents et fortement hétérozygotes. On qualifie d'hybrides ces individus, et de « variété hybride » leur ensemble, bien que ce terme fût d'abord utilisé pour désigner le produit du croisement entre deux espèces.

Quand deux allèles différents se trouvent ainsi réunis dans un même génome, il se peut que seul le caractère déterminé par l'un d'entre eux soit apparent. On dit alors que cet allèle est dominant sur l'autre, qui est qualifié de récessif. Souvent, un allèle récessif correspond à l'inactivation d'un gène par une mutation. Plus généralement, l'aspect observable d'un individu pour un ou plusieurs

caractères est désigné sous le terme de phénotype. Celui-ci est conditionné par le génotype et les effets éventuels du milieu environnant.

Les systèmes de reproduction des plantes

La production de semences et de plants est tributaire des modes de reproduction qui varient d'une espèce à l'autre. Cette reproduction s'effectue pour certaines espèces de façon presque exclusive, par multiplication à partir d'organes végétatifs et pour la plupart, par des processus sexuels.

La reproduction sexuée

Les modalités de la reproduction sexuée sont extrêmement variées d'une espèce à l'autre et ne sont pas strictement figées au sein d'une espèce. Cette versatilité enrichit, au travers de ce qu'on peut considérer comme des anomalies de reproduction, les possibilités d'adaptation des espèces à leurs milieux et fournit à l'homme des outils d'amélioration génétique.

Les étapes de la sporogénèse et de la gamétogénèse : cas des Angiospermes

La reproduction sexuée chez certaines plantes à sexes séparés était connue des Anciens. Par exemple, la pollinisation du palmier-dattier faisait l'objet en Mésopotamie de cérémonies religieuses 1 000 ans av. J.-C. Il est probable que les individus femelles, seuls à produire des fruits étaient l'objet de plus de soins que les individus mâles, en trop grand nombre quand la fécondation peut être contrôlée. Mais, il a fallu attendre la fin du XVII^e siècle et les travaux de J. Bobart (1678) et R.J. Camerarius (1690) pour que la sexualité des végétaux soit reconnue. Le siècle suivant sera celui des premières expériences d'hybridations entre espèces avec K. von Linné et J.G. Kölreuter. La germination du pollen et par conséquent son rôle exact dans la reproduction fut découverte en 1822 par G.B. Amici, et la cellule sexuelle femelle (l'oosphère) par W. Hofmeister en 1849. C'est en 1898 que le Russe S.G. Nawashin et un an après le Français L. Guignard ont décrit la double fécondation.

La sporogénèse femelle (fig. 1) se réalise dans l'ovule où une cellule du nucelle, tissu interne de l'ovule (cette cellule est appelée macrosporocyte) subit une méiose qui conduit à quatre cellules plus ou moins alignées dont trois dégénèrent. C'est dans la quatrième qu'a lieu la gamétogénèse femelle par le développement d'un sac embryonnaire lors d'une succession de mitoses (trois dans le cas le plus fréquent). Ce sac embryonnaire qui est le gamétophyte (haploïde) femelle comprend le gamète femelle proprement dit, ou oosphère, deux synergides proches de celle-ci et la cellule centrale diploïde dont le noyau résulte de la fusion de deux noyaux haploïdes identiques. Il comprend, en outre, trois autres cellules nommées antipodes situées à l'opposé de l'oosphère.

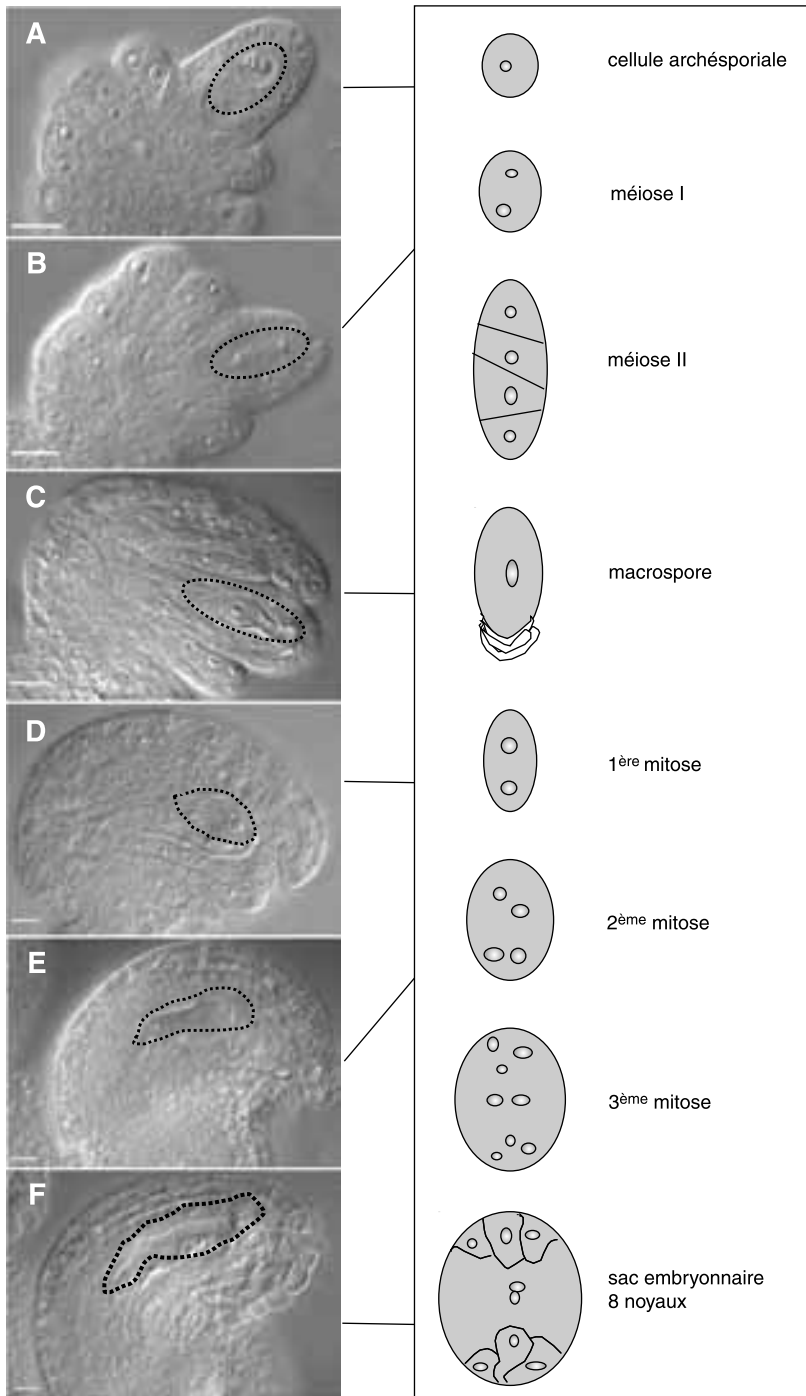


Figure 1 – A à F. Sporogenèse et gamétogenèse femelle chez *Arabidopsis thaliana*. À droite, représentation schématique et légende (clichés M. Grelon et D. Vezon). Échelle : 10 µm.

La sporogénèse mâle (plche coul. 1) se produit, dans l'étamine, à partir des microsporocytes issus des cellules archésporiales (photo A) qui, par division méiotique (photos C, D et E), produisent quatre spores réunies en tétrades (photo B). Dans chaque cellule d'une tétrade a lieu la gamétogénèse mâle avec la formation d'une microspore (photo F) où s'effectue une première division cellulaire, dissymétrique, avant la différenciation en un grain de pollen (photo G) comprenant une cellule végétative et une cellule reproductrice. Cette dernière, incluse dans la précédente se divisera, suivant les espèces, avant la libération du pollen (cas des Monocotylédones et des Brassicacées ou Crucifères) (photo H) ou pendant la croissance du tube pollinique dans le style, pour former les deux gamètes mâles.

La pollinisation, transport et dépôt du pollen sur le stigmate, sera suivie, dans le style, de la germination et de la croissance d'un tube pollinique (photos I et J) qui assurera l'introduction des deux gamètes mâles dans une des deux synergides, l'un réalisant la fécondation de l'oosphère, pour former le zygote, l'autre celle de la cellule centrale pour former l'albumen : c'est la double fécondation dont nous avons parlé précédemment.

Le zygote va suivre une série de divisions aboutissant progressivement à la constitution d'une structure polarisée avec un méristème caulinaire qui élaborera la partie aérienne de la future plante (la tige et les feuilles), un axe hypocotylé et un méristème radiculaire. Chez les Dicotylédones, la plantule contenue dans la graine mûre possède une symétrie bilatérale matérialisée par les deux cotylédons, sortes de feuilles primordiales remplies de réserves qui permettront à la plantule de s'établir après la germination. L'albumen, après un développement important disparaît pratiquement car il est en général « recyclé » par l'embryon proprement dit au cours de sa phase d'accumulation de réserves. Chez les Monocotylédones, un seul cotylédon se développe (on le nomme scutellum) et l'albumen accumule l'essentiel des réserves amyliacées et protéiques du grain.

Une ou plusieurs étapes du processus de reproduction peuvent être omises chez certaines espèces. Par exemple, des embryons peuvent se développer directement à partir d'une cellule du nucelle, par embryogénèse adventive; des spores diploïdes peuvent être produites sans méiose préalable (aposporie), ou résulter d'anomalies de l'une ou l'autre des divisions méiotiques; des embryons haploïdes ou diploïdes peuvent être produits *in situ* ou même induits à partir des gamétophytes ou des gamètes eux-mêmes. Ces anomalies de développement, en général assez rares ou minoritaires, peuvent chez certaines espèces, devenir la règle (cas des embryons nucellaires chez les *Citrus*, de l'aposporie chez le pissenlit ou le millepertuis ou des gamètes diploïdes en forte proportion chez des espèces sauvages voisines de la pomme de terre).

La répartition des sexes suivant les espèces

Les organes reproducteurs ne sont pas répartis de façon uniforme chez les plantes supérieures Phanérogames (Gymnospermes et Angiospermes).

On distingue trois types de fleur : hermaphrodite (H) ou bisexuée, c'est-à-dire contenant à la fois des étamines et un pistil fonctionnels; androïque (A) ou staminée, ne possédant que des étamines, et gynoïque (G) ou pistillée, ne possédant que des organes femelles.

Au niveau de l'individu, un seul ou plusieurs types peuvent coexister, ce qui porte à sept le nombre de possibilités : H, A, G, A+G, H+A, H+G, H+A+G.

Au niveau de l'espèce et donc d'une population d'individus, le nombre théorique de combinaisons devient très grand. En pratique cependant, les trois possibilités suivantes sont majoritaires.

Premier cas (celui de plus de 72 % des espèces Phanérogames) : fleur hermaphrodite et espèces composées d'individus portant tous le même type de fleur : ces individus sont à la fois mâles et femelles (hermaphroditisme).

Exemples : abricotier, amandier, arachide, aubergine, betterave, blé, cacaoyer, caféier, carotte, céleri, chicorée, colza, chou, cotonnier, eucalyptus, féverole, haricot, laitue, lin, lupin, luzerne, mil, oignon, oranger et autres agrumes, orge, pêcher, pétunia, piment, poirier, pois, pommier, pomme de terre, prunier, radis, riz, seigle, soja, sorgho, tabac, théier, tomate, tournesol, trèfle, tulipe, vigne.

Cette structure florale favorise la fécondation d'un individu par lui-même (autofécondation) qui conduit au régime de reproduction qu'on nomme autogamie. Elle peut conduire au cas extrême de la cléistogamie, quand la fécondation a lieu alors que la fleur reste fermée.

Néanmoins, une autre situation fréquemment rencontrée est la fécondation croisée qui conduit à l'allogamie. En effet, les plantes hermaphrodites possèdent souvent des systèmes qui favorisent les fécondations croisées comme des barrières morphologiques (hétéromorphie), un décalage entre la maturité pollinique et celle du pistil, ou des mécanismes cellulaires et moléculaires d'auto-incompatibilité.

Chez ces espèces, la réalisation de croisements contrôlés et la production de semences de variétés hybrides nécessitent d'assurer une castration des « porte-graines », c'est-à-dire la suppression des organes mâles qui, à grande échelle, ne peut être effectuée manuellement.

Deuxième cas (celui de 7 % des espèces Phanérogames) : fleur mâle (A) et fleur femelle (G) séparées, mais portées par le même individu qui demeure hermaphrodite et espèce composée d'individus identiques (monoécie).

Exemples : cèdre, châtaigner, chêne, épicéa, hévéa, maïs, manioc, noisetier, noyer, olivier, pacanier, pin, ricin, sapin, etc.

Ce mode de reproduction est particulièrement favorable aux inter-fécondations, donc à l'allogamie. Il est également, sur un plan pratique, propice à la fabrication de variétés hybrides, puisque la castration des plantes « porte-graines » peut se faire manuellement ou mécaniquement par élimination des inflorescences mâles (cas des hybrides de maïs).

Troisième cas (celui de 4 % des espèces Phanérogames) : fleur mâle (A) et fleur femelle (G) portées par des individus différents (dioécie).

Exemples : asperge, chanvre, épinard, figuier, palmier-dattier, papayer, peuplier, pistachier, poivrier, saule, etc.

Ce mode de reproduction qui est la règle chez les espèces animales avec un sexe mâle hétérogamétique, de formule génétique XY (ou au moins hétérozygote pour un locus gouvernant le caractère mâle : *Mm*) et un sexe femelle homogamétique XX (ou homozygote *mm*), est donc minoritaire chez les plantes. Il est très rare que l'on puisse différencier ces chromosomes par l'observation cytologique, comme dans le cas du *Melandrium album*. Ces formes sexuées dérivent certainement de formes hermaphrodites ancestrales comme en témoigne l'existence, dans ces espèces, de faibles proportions d'individus bisexués qui proviennent de mutations ou de recombinaisons. Suivant le type d'utilisation de l'espèce, on peut avoir intérêt à ce que prédomine une forme plutôt qu'une autre, par exemple, femelle chez le palmier-dattier pour la production des dattes et mâle chez l'asperge, car les plantes mâles sont plus productives.

Cas plus complexes

Les autres espèces comprennent celles où coexistent, chez le même individu, différents types sexuels (au total 7 % des espèces) : gynomonoécie (H+G), andromonoécie (H+A), androgynomonoécie (H+A+G), etc. C'est le cas par exemple, de certaines Cucurbitacées : le melon et la pastèque avec des plantes (H+A) ou (A+G) et le concombre avec des plantes (H) ou (A+G). Chez le poivrier, on trouve même des plantes (H), des plantes (A+G), des plantes (A) et des plantes (G).

Enfin, chez 10 % des espèces, coexistent des plantes unisexuées et bisexuées, notamment plantes (H) et plantes (G) : le type sexuel est la gynodioécie; c'est le cas, par exemple, de la centaurée, de l'origan, de la ravenelle, du thym.

Une anomalie singulière : l'apomixie

Le phénomène d'apomixie résulte d'anomalies de la sporogénèse femelle qui se déroule sans méiose et qui conduit à des semences contenant un embryon identique à la plante utilisée comme femelle. Il s'agit, du point de vue génétique, d'une multiplication clonale.

Ce phénomène, dont les modalités sont variables, est signalé chez plus de trois cents espèces, sauvages pour la plupart (par exemple, dans les genres *Alchemilla*, *Antennaria*, *Brachiaria*, *Chondrilla*, *Crepis*, *Erigeron*, *Eupatorium*, *Hieracium*, *Pennisetum*, *Poa*, *Potentilla*, *Ranunculus*, *Rubus*, *Taraxacum*, *Tripsacum*, ...).

La multiplication végétative

La multiplication végétative assure une reproduction à l'identique (un clonage génétique) des individus. Elle peut suivre différentes modalités grâce à la différenciation d'organes particuliers chez certaines espèces (stolons, tubercules,

bulbes, etc.), ou la mise en œuvre par l'homme de pratiques horticoles (bouturage, marcottage, greffage).

Ces modes de reproduction végétative concernent un grand nombre d'espèces cultivées ornementales, fruitières et légumières.

Les modes spontanés de multiplication végétative

Certaines plantes sont pourvues de rhizomes qui sont des tiges souterraines horizontales sur lesquelles des bourgeons axillaires se développent en plantes individuelles. C'est le cas, par exemple, du chiendent, du muguet, de l'iris, etc. Une forme très proche de propagation se fait par des stolons qui sont également des tiges à feuilles très réduites et à entre-nœuds allongés, produisant de nouvelles plantes qui s'enracinent à chaque nœud. L'exemple le plus connu est le fraisier.

Les bulbes sont des tiges souterraines sans allongement des entre-nœuds et avec un développement hypertrophié des feuilles. Des bulbes axillaires (ou bulbilles) assurent la multiplication. Ces derniers peuvent se former également au niveau de l'inflorescence comme dans le cas de certains *Allium*.

Enfin, on désigne sous le nom de tubercules, des portions de tiges souterraines (cas de la pomme de terre) ou de racines (cas du topinambour et du manioc), hypertrophiées par l'accumulation de réserves glucidiques. Sur ces tubercules, des bourgeons axillaires (les « yeux ») sont capables de produire une nouvelle tige.

Les pratiques horticoles

Le bouturage consiste à mettre en terre un rameau sans racine et à obtenir spontanément son enracinement, qu'il résulte de néoformation de racines au niveau de la section (cas du pélargonium), ou du développement de méristèmes racinaires latents (cas du peuplier). Le traitement par une hormone végétale, une auxine, peut favoriser cet enracinement.

Le marcottage consiste à forcer un rameau latéral à prendre la position d'un stolon, ce qui va provoquer le démarrage des bourgeons axillaires et leur enracinement au contact du sol. Les plantes obtenues peuvent ensuite être séparées de la plante mère.

Le greffage fut introduit en Gaule par les Romains, héritiers indirects des Perses et peut-être des Chinois. Il consiste à prélever une très jeune tige ou un bourgeon (le greffon) et à l'implanter sur un porte-greffe en mettant en contact les tissus conducteurs des deux partenaires. Une prolifération cellulaire et une différenciation des tissus néoformés sont nécessaires à l'union du greffon et du porte-greffe. Ceci implique une compatibilité génétique des partenaires. Parmi les avantages de la pratique du greffage, en particulier chez les espèces ligneuses, on peut citer l'adaptation aux conditions physico-chimiques du sol et la protection contre des parasites ou des agents pathogènes (cas de la vigne et du phylloxéra en Europe à la fin du XIX^e siècle) que peut conférer le porte-greffe,

alors que le greffon apportera les caractéristiques de productivité et de qualité recherchées. Le porte-greffe peut appartenir à la même espèce que la variété, à une espèce différente ou être un hybride interspécifique plus ou moins complexe. Sa multiplication peut être assurée par semis, par bouturage ou même par marcottage.

Depuis quelques décennies, des méthodes de multiplication végétative *in vitro* (microbouturage, culture de méristèmes, embryogenèse somatique) ont permis de compléter ces pratiques horticoles. Elles seront abordées page 47.

Les principes de l'amélioration des plantes

L'amélioration des plantes peut être globalement définie comme l'ensemble des activités tendant à « l'ajustement génétique » des plantes au service de l'homme et comme la réalisation de multiples adaptations aux milieux physique, biologique et économique.

Cette amélioration répond à plusieurs objectifs :

- la nécessité de satisfaire les besoins alimentaires croissants créés par l'augmentation démographique,
- la recherche permanente d'une amélioration de la production agricole et de sa qualité,
- la modification incessante des objectifs de sélection due à l'évolution des exigences des transformateurs et des consommateurs,
- la nécessité d'adapter les variétés aux conditions environnementales et de production, variables dans le temps et dans l'espace.

Aperçu historique

L'agriculture remonte à plus de 10 000 ans. Elle a succédé très progressivement à la cueillette. Elle s'est traduite d'abord par des transformations profondes des espèces, qu'on rassemble sous le terme de « domestication », résultat d'une succession continue de choix, conscients ou non, parmi les mutations spontanées, de manière à améliorer la culture, la récolte, ainsi que les qualités de consommation et de conservation des produits. Le maïs, par exemple, issu d'une espèce sauvage, le téosinte, est une création humaine progressive où un nombre limité de mutations principales (de l'ordre de 5) l'ont converti en une plante non ramifiée, possédant une panicule mâle complexe et un épi femelle à plusieurs rangs avec une attache solide des grains de bien meilleure qualité sur le rachis (ou rafle), facilitant leur récolte et leur conservation.

Les espèces cultivées ont continué à évoluer au cours des millénaires qui ont suivi, au fur et à mesure des générations de reproduction. Contrairement à ce qui a pu se passer pour les animaux domestiques, l'homme est longtemps resté dans l'ignorance des processus de reproduction des plantes. L'idée de créer de nouvelles espèces par hybridation ne viendra qu'au XVIII^e siècle. Au début du XIX^e siècle, T.A. Knight et A. Sageret, notamment, vont ébaucher les prémices

de la génétique végétale à partir de l'étude de croisements entre variétés d'une même espèce.

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, le soin à apporter à la production de semences, le choix des meilleurs individus comme porte-graines (et parfois leur isolement), à condition qu'ils aient été produits dans les bonnes conditions, étaient les seules façons d'améliorer les variétés. La « dégénérescence des races végétales », concept alors banal, était combattue par le changement de terrain !

Les véritables progrès en sélection vont commencer au XIX^e siècle grâce à des précurseurs comme P. Sherriff en Écosse et L. et H. de Vilmorin en France. Le jugement des performances des plantes va très tôt s'appuyer sur des mesures objectives : par exemple, le saccharimètre est utilisé dès 1853 (peu de temps après son invention) pour l'amélioration du taux de sucre de la racine de betterave sucrière par L. de Vilmorin. Ces précurseurs ont élaboré des méthodes de sélection qui sont toujours en pratique. Cependant, ils ignoraient les lois de l'hérédité qui ne seront intégrées à la sélection qu'au début du XX^e siècle après la « redécouverte » des travaux publiés par G. Mendel en 1865.

Au cours du XX^e siècle, ces méthodes renforcées par la connaissance des lois de la génétique vont déboucher sur la création de très nombreuses variétés améliorées, en particulier des lignées pures pour les espèces autogames.

Pour certaines espèces allogames comme le maïs, le progrès ne sera significatif qu'avec le développement au cours du XX^e siècle, des variétés hybrides dont l'intérêt fut suggéré par G.H. Shull aux États-Unis dès 1908.

Afin de favoriser la création variétale et le développement de nouvelles variétés, à l'initiative de chercheurs et de professionnels français, une réflexion sur un système de protection juridique, applicable au matériel biologique, fut lancée. Ce système a été mis en place par la Convention pour la protection des obtentions végétales signée le 2 décembre 1961 à Paris, par quelques états regroupés au sein de l'Union pour la protection des obtentions végétales (UPOV).

Principes généraux

À partir d'un individu donné ou d'un groupe d'individus d'une certaine espèce ayant déjà certaines qualités, le sélectionneur cherche à créer un ensemble d'individus améliorés en introduisant de nouveaux caractères plus adaptés (phase de sélection créatrice). Ceci nécessite la recherche des individus qui les possèdent dans la même espèce ou dans une espèce apparentée. Le sélectionneur dispose de la variabilité présente dans les ressources génétiques. Ces ressources génétiques sont constituées de variétés cultivées actuelles ou plus anciennes, de populations locales, de populations sauvages et même d'espèces apparentées. Elles font régulièrement l'objet de collectes et sont rassemblées dans des collections publiques ou privées. Le sélectionneur peut aussi avoir recours à diverses méthodes pour augmenter la variabilité (*cf.* p. 39). Il introduit ensuite ces caractères par croisements pour tenter de les rassembler dans un même génotype.

À la suite de ces croisements, il faut savoir discerner et retenir les meilleurs individus. Cette sélection, au cours des générations successives de fixation génétique, passe par des expérimentations rigoureuses avec des dispositifs statistiques multilocaux pour faire la part de l'effet génétique et de l'effet de l'environnement sur le phénotype. Ainsi, on peut s'assurer que les caractères exprimés par la plante sont bien héréditaires.

Une fois que ces caractères favorables sont fixés, il faut pouvoir diffuser cette amélioration, c'est-à-dire la mettre à la disposition des agriculteurs, en quantité suffisante, sous forme d'une nouvelle variété cultivée (ou « cultivar »). La production de semences ou de plants est une nouvelle étape qui doit conserver les caractéristiques de la variété (phase de sélection conservatrice). La commercialisation d'une variété est soumise à un certain nombre de critères réglementaires variables d'un pays à l'autre (*cf.* p. 38).

Pour améliorer une espèce, d'autres paramètres biologiques doivent être pris en compte comme :

- la durée du cycle de reproduction et du cycle biologique. Une plante annuelle (par exemple, le blé) ou bisannuelle (par exemple, la laitue) ne sera pas traitée de la même manière qu'une plante pérenne (par exemple, les arbres fruitiers ou les arbres forestiers) ;
 - le taux de multiplication de l'espèce, de quelques individus à plusieurs milliers.
- L'étude de la descendance sexuée fera donc appel à des méthodes très différentes.

Influence du mode de reproduction sur les méthodes de sélection

Le mode de reproduction conditionne la structure génétique des populations, influence directement le choix des méthodes de sélection employées et détermine le type de variétés cultivées (fig. 2).

Structure des populations selon le système de reproduction

Certaines espèces à reproduction sexuée sont autogames. Ce sont, par exemple, le blé, l'orge, le riz, la vesce, le soja, l'arachide, le haricot, le pois, la laitue, le piment, la tomate, le tabac, le lin, le pêcher. Les individus qui les composent proviennent de générations successives d'autofécondations et sont donc homozygotes pour la quasi-totalité de leurs gènes. La variabilité génétique est répartie dans l'espèce parmi une multitude de lignées pures qui, prises deux à deux, sont relativement proches l'une de l'autre.

D'autres espèces sont allogames. Ce sont, par exemple, le maïs, le seigle, le ray-grass, le dactyle, la fétuque, la luzerne, le trèfle, la betterave, l'asperge, la carotte, la chicorée, le chou, le melon, l'oignon, le poireau, le tournesol, l'artichaut, le pommier, le poirier, le bananier, l'olivier, le palmier-dattier. Les individus qui composent l'espèce proviennent alors de croisements systématiques. Ils sont hétérozygotes pour un grand nombre de leurs gènes et, à chaque génération, ces gènes sont systématiquement brassés. Une mutation récessive délétère peut être

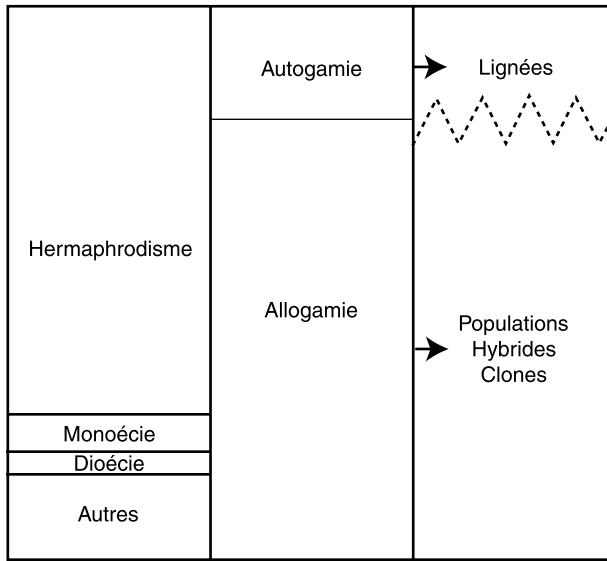


Figure 2 — Répartition, parmi les Phanérogames, des caractéristiques de la reproduction et conséquences sur les types de variétés cultivées. A : types sexuels ; B : modes de reproduction ; C : types variétaux. La hauteur des compartiments représente grossièrement la proportion des différentes catégories.

maintenue et reproduite sans être contre-sélectionnée, puisque masquée. Des résultats récents montrent chez le maïs, qui est l'exemple type de ces espèces, que certaines portions du génome peuvent être perdues sur l'un ou l'autre des deux chromosomes de chaque paire : seul un individu hybride peut, par conséquent, posséder un répertoire complet de gènes. Un individu soumis à une autofécondation donnera en descendance des individus très différents les uns des autres et en moyenne peu vigoureux. Une consanguinité plus poussée conduit à une perte de vigueur importante (effet d'*inbreeding*). Inversement, la plus grande vigueur sera obtenue par l'addition des gènes provenant de deux lignées très différentes (« effet d'hétérosis »).

Enfin, certaines espèces sont pratiquement stériles et se reproduisent presque essentiellement par voie végétative. C'est le cas, par exemple de l'ail, de l'échalote, de l'igname, de la pomme de terre, du fraisier, du framboisier et de nombreuses espèces ornementales. Les populations sont alors composées de clones, c'est-à-dire d'ensembles d'individus identiques.

Les méthodes de sélection

Pour aboutir à une population améliorée à partir d'une population donnée, il existe plusieurs méthodes de sélection, reposant toutes sur l'observation du phénotype.

La sélection massale, qui consiste à retenir la descendance des meilleurs individus sans intervenir sur leur mode de reproduction, s'opère plus ou moins

inconsciemment par le simple fait de retenir une partie de la récolte, donc surtout les descendants des individus les plus productifs. Cette pratique très ancienne a permis de faire évoluer les populations de plantes autogames. Par contre, elle a eu beaucoup moins d'effet sur les populations de plantes allogames.

La sélection généalogique, quant à elle, consiste à concevoir que, malgré les apparences, les populations peuvent être des mélanges de génotypes. On peut, par conséquent, les améliorer en multipliant les meilleurs individus repérés non pas en les appréciant eux-mêmes, mais d'après les caractéristiques de leur descendance (d'où le nom de la méthode). Historiquement cette méthode a conduit à sélectionner les meilleurs génotypes dans des populations de blé, d'orge (espèces autogames) ou même de betterave sucrière (espèce allogame).

Plusieurs variantes de cette méthode sont aujourd'hui appliquées. La sélection généalogique mise en œuvre pour extraire par autofécondation les meilleures lignées de populations a trouvé naturellement son prolongement dans la sélection sur la descendance des croisements entre variétés entrepris pour combiner les caractères des unes et des autres. Il s'agit de la sélection généalogique au sens moderne du terme, qu'on réserve aux espèces autogames.

Après une hybridation, chaque individu de la descendance F_2 de l'hybride F_1 est repéré en fonction de ses caractéristiques et de celles de sa descendance. Après sélection, un petit nombre de familles subsiste et au cours des générations successives, qui varient de 6 à 10, une nouvelle variété pourra être créée (fig. 3).

Ces méthodes visent toutes à limiter la perte trop rapide de variabilité et à exercer la pression de sélection sur des descendance les plus homozygotes possibles (sélection en mélanges ou méthode *bulk* et sélection après filiation mono-graine (ou unipare) ou *Single Seed Descent*, SSD).

Lorsque le sélectionneur souhaite introduire un caractère simple dans une lignée déjà améliorée, par exemple une résistance à un parasite, il utilise le rétro-croisement (*backcross*). À partir de la plante résistante (plante donneuse), il réalise un croisement avec la lignée qui est ensuite utilisée de façon récurrente pour obtenir après plusieurs générations successives la même lignée, mais portant le caractère de résistance. Le nombre de générations nécessaire est de l'ordre de 6 à 8 (fig. 4). L'accélération des générations (en serre ou même à contre-saison dans l'autre hémisphère) permet au sélectionneur de diminuer fortement le temps nécessaire à la création de la nouvelle variété.

Les méthodes d'amélioration des espèces allogames tendent aussi vers la création de variétés homogènes. Puisqu'il est difficile de contrôler l'origine du pollen, le repérage des origines maternelles des descendance est un moyen d'obtenir une meilleure homogénéité.

Le cumul du maximum de caractères favorables implique le croisement répété sur plusieurs générations des populations en cours d'amélioration. C'est la base des nombreuses méthodes de sélection récurrente.

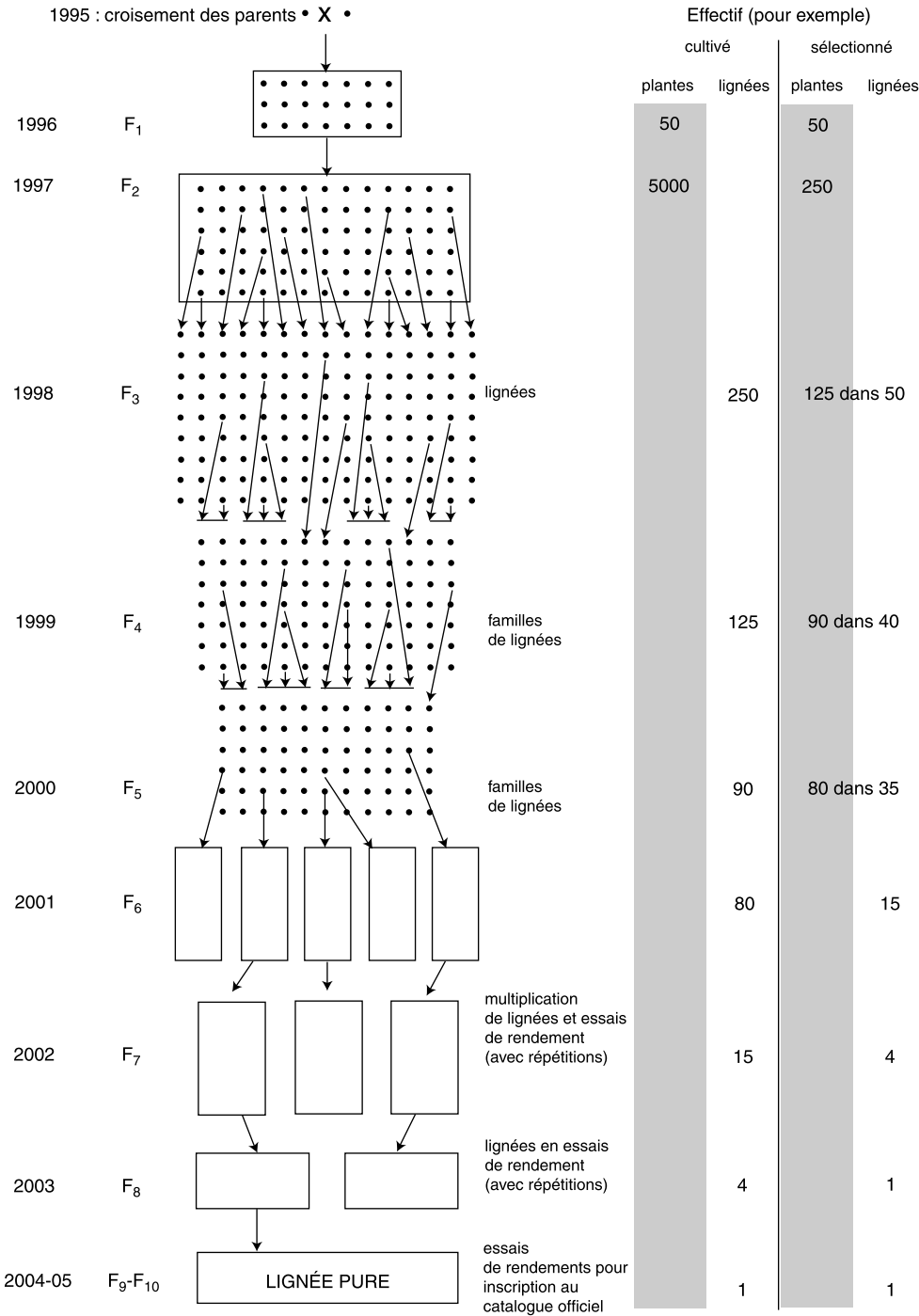


Figure 3 – Schéma de sélection généalogique après hybridation chez une espèce autogame annuelle (d'après Y. Hervé et G. Thomas, Agrocampus, Rennes).

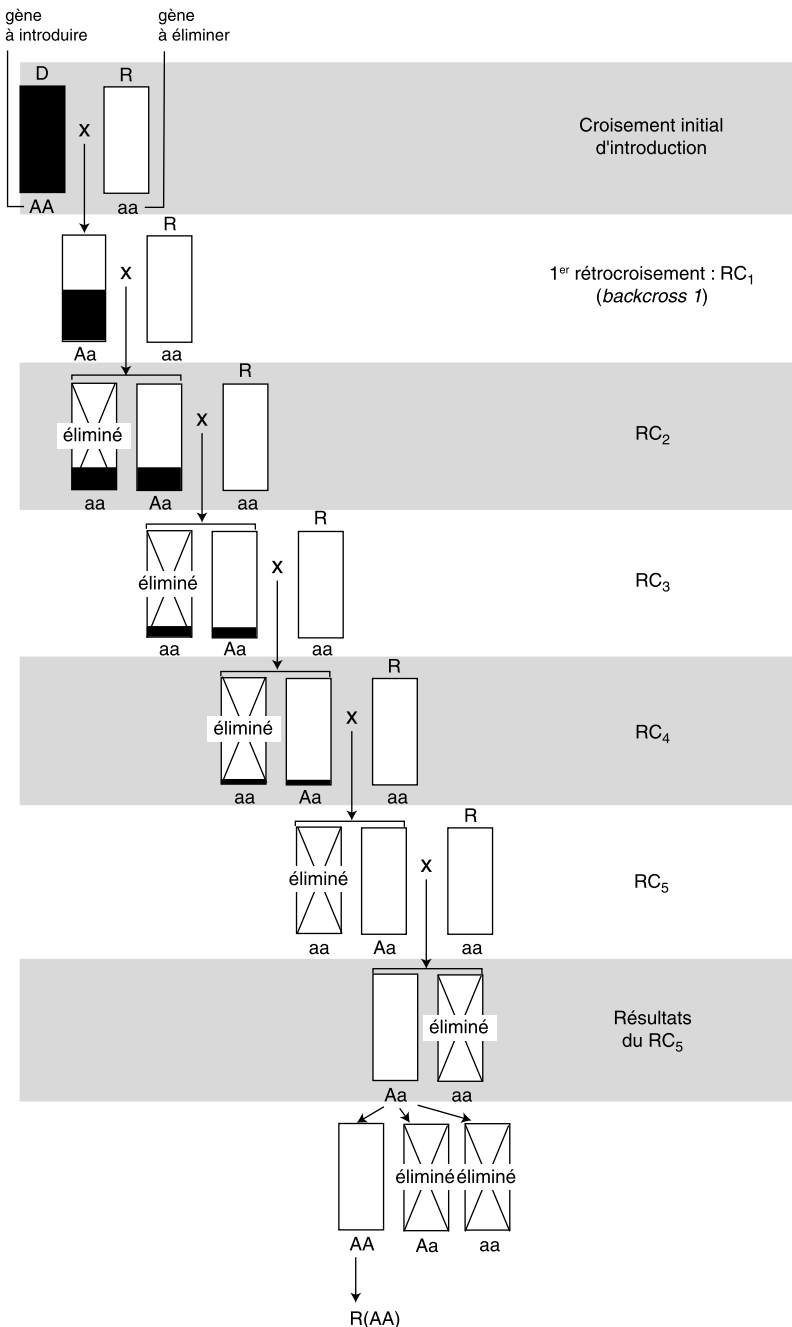


Figure 4 — Schéma de sélection par rétrocroisements pour l'introduction d'un caractère monofactoriel dominant A. Le génome du donneur D, figuré en noir, est réduit en moyenne de moitié à chaque génération pour ne comporter pratiquement que le gène dominant d'intérêt A, substitué à l'allèle a, dans le génome du receveur R, figuré en blanc (d'après Y. Hervé et G. Thomas, Agrocampus, Rennes).

Pour obtenir une homogénéité encore plus grande et une vigueur supérieure à la moyenne des populations utilisées, on peut développer des variétés hybrides. La combinaison hybride favorable sélectionnée résulte de parents choisis à la fois pour leur valeur respective (valeur propre) et pour leur capacité à s'hybrider en donnant un individu hybride performant (aptitude à la combinaison). Si deux populations sont l'une et l'autre sélectionnées de génération en génération pour leur aptitude à produire des hybrides performants entre elles, on parle de sélection récurrente réciproque.

Pour les espèces où le recours à la multiplication végétative est nécessaire pour la reproduction à l'identique de la variété, il est recherché des génotypes performants, soit à partir de populations génétiquement non fixées où des mutations spontanées ou induites peuvent être sélectionnées, soit à partir d'individus créés par croisement, c'est la sélection clonale.

Chez les arbres fruitiers, la plupart des espèces cultivées sont constituées de deux entités génétiques distinctes associées lors d'une opération de greffage de la variété sur un porte-greffe. Le porte-greffe, qui correspond à la partie racinaire de l'arbre fruitier greffé, permet d'élargir l'aire de culture des espèces fruitières et d'améliorer globalement les performances des variétés. La variété correspond à la partie aérienne portant les fruits. Ces deux types de matériel génétique font l'objet de travaux d'amélioration génétique et de sélection, mais avec des objectifs affichés différents. Pour les porte-greffe, les objectifs principaux sont l'aptitude à la propagation, la qualité du plant en pépinière, la compatibilité au greffage, la tolérance aux stress biotiques et abiotiques. La sélection d'un porte-greffe passe nécessairement par sa confrontation à une gamme de variétés et/ou d'espèces fruitières en vue de préciser les interactions porte-greffe/greffon. Celles-ci peuvent se traduire par des incompatibilités au greffage plus ou moins spécifiques, plus ou moins exprimées, et peuvent être de type mécanique ou physiologique, les mécanismes génétiques et moléculaires correspondants étant encore peu connus. Enfin, le porte-greffe peut conférer une vigueur déterminée à un ensemble de variétés. La sélection des variétés, dans ce cas, passe aussi par l'étude de l'interaction de la variété avec une gamme de porte-greffe. Les méthodes de sélection correspondantes sont donc lourdes à mettre en œuvre et demandent des cycles de sélection d'une vingtaine d'années, durée difficilement compressible.

Type variétal

Chez les espèces autogames, les variétés cultivées sont généralement des lignées pures, ce qui assure leur homogénéité et leur stabilité. Il faut signaler une exception notable, la tomate (multipliée par semences), espèce autogame dont la majorité des variétés sont des hybrides entre deux lignées pures.

Afin d'augmenter l'adaptabilité au milieu, le sélectionneur peut créer des variétés multilignées, c'est-à-dire des mélanges de lignées pures identiques pour

tous les caractères importants, sauf pour un comme la résistance à un agent pathogène, où chaque lignée présentera un allèle particulier, afin de limiter la dissémination de la maladie.

Chez les espèces partiellement ou totalement allogames, les variétés étaient traditionnellement, et sont souvent encore, cultivées sous forme de populations hétérogènes. Une meilleure homogénéité est obtenue par la constitution de variétés synthétiques qui dérivent de la reproduction, pendant un nombre limité de générations, d'un nombre restreint de parents.

La solution qui permet d'atteindre l'homogénéité maximale est de produire un hybride constitué d'un seul génotype : l'hybride simple ou hybride F_1 . Ce type variétal s'avère plus productif, plus vigoureux (effet d'hétérosis) et plus homogène que les variétés populations ou les lignées pures. L'hybride F_1 présente aussi l'avantage de réaliser le cumul rapide de gènes dominants comme des résistances aux maladies. Il arrive que pour des raisons de productivité en semences, on produise un hybride double ou quatre voies (faisant intervenir deux hybrides simples, donc 4 lignées parentales) ou un hybride trois voies (combinaison d'un hybride simple pris comme femelle et d'une lignée, donc 3 lignées parentales).

Dans le cas de plantes où l'on maîtrise à la fois la reproduction sexuée et la reproduction végétative, la sélection de clones ayant une bonne aptitude à la combinaison deux à deux permet la création de variétés hybrides. On obtient alors des variétés hybrides de clones. Cependant, il y a nécessité d'avoir, non seulement un système de contrôle de la pollinisation, mais aussi un coefficient de multiplication végétative compatible avec la quantité de semences recherchée.

Enfin, des variétés clonales ou clones sont produites pour diffuser des génotypes complexes de certaines espèces, qui ne peuvent pas être reproduits par semences, et qui sont multipliés végétativement par des techniques horticoles ou *in vitro*.

Production de semences et de plants et commercialisation

La production de semences de lignées pures se fait par simple autofécondation en s'assurant, à chaque génération, de la conformité des individus mis en multiplication. Chaque parent est constitué d'une population d'individus dont l'effectif dépend du taux de multiplication de l'espèce (il faut un hectare de production de semences pour ensemercer environ 200 ha de maïs ou de tournesol et 500 ha de colza).

La production de semences hybrides est plus complexe car il faut à la fois produire, donc multiplier à l'identique, les plantes porte-graines (plantes utilisées comme parents femelles issues de lignées souvent peu vigoureuses) et les pollinisateurs (plantes utilisées comme parents mâles), exclure l'autofécondation du porte-graines et s'assurer de la pollinisation exclusive de celui-ci par le parent mâle choisi. Il faut donc prendre des précautions pour éviter des pollinisations incontrôlées.

Il existe diverses méthodes pour contrôler l'hybridation. La castration manuelle ou mécanique, pratiquée, en particulier, dans le cas des espèces monoïques comme le maïs ou des espèces hermaphrodites comme l'aubergine, le piment, la tomate, ... où la morphologie de la fleur et la quantité de semences à produire s'y prêtent. Pour d'autres espèces, le contrôle de l'hybridation est basé sur l'utilisation d'un système génétique responsable de l'absence de pollen dans certaines fleurs d'espèces hermaphrodites (stérilité mâle) (cas de la betterave, du maïs, du sorgho, du riz, du tournesol, du colza, du chou, de l'oignon, du poireau, de la carotte,...) ou d'un système d'auto-incompatibilité entre le pistil et le pollen des fleurs d'une même plante (cas du chou) ou même d'un système de compétition pollinique (cas de la chicorée endive). Ce sont presque toujours des systèmes existant à l'état spontané qui sont ainsi utilisés pour la production de semences hybrides. En leur absence, on a parfois recours à une castration chimique à l'aide de gamétocides qui ne détruisent en fait que les gamétophytes mâles.

La production et la commercialisation des semences des variétés végétales doivent répondre à un certain nombre de critères réglementaires. Outre des caractéristiques de valeur agronomique nécessaire à l'inscription, il faut que la variété puisse être distinguée des autres par des caractères morphologiques, être homogène en particulier pour des caractères distinctifs, et être identique à elle-même d'une année à l'autre. Ces critères de distinction, homogénéité, stabilité (DHS) constituent des garanties pour la commercialisation d'un produit biologique, la semence, qui tend à ressembler aux caractéristiques d'un produit manufacturé. Les variétés doivent répondre à ces critères en suivant des modes de reproduction différents d'une espèce à l'autre, que, dans une certaine mesure, la nature impose.

Méthodes pour augmenter la variabilité génétique

Exploitation de mutants spontanés et création de mutants

Les variétés locales de multiples espèces, en particulier les plantes ornementales et les arbres fruitiers, ont essentiellement pour origine des mutations spontanées. Dès l'Antiquité, des variants d'espèces cultivées ont été sélectionnés. C'est le cas des raisins de Corinthe connus depuis l'Égypte ancienne, des mutants nains de blé découverts au Japon à la fin du XIX^e siècle qui sont à l'origine des blés actuels de taille courte, des mutants monogermes décrits chez la betterave sucrière en 1948 ou encore des mutants *afila* du pois. L'utilisation de ces mutations a considérablement modifié la culture de ces espèces. Dans le domaine des plantes ornementales, les mutations spontanées sont particulièrement recherchées : la couleur orange des roses est due à une mutation qui provoque la synthèse d'un pigment nouveau chez le rosier : la pélargonidine.

Ces mutations spontanées peuvent correspondre non seulement à des mutations ponctuelles mais aussi à l'insertion de transposons ou de rétro-transposons. Ces éléments mobiles de l'ADN ont probablement joué un rôle important

Tableau 1 — Exemples de variétés portant des caractères issus de mutagenèse induite.

Espèce améliorée	Caractère obtenu	Année d'inscription et nom de la variété
Pamplemoussier (<i>Citrus maxima</i>)	Couleur rouge de la pulpe Aspermie	1984, 'Ruby Red' 1970, 'Star Ruby'
Riz (<i>Oryza sativa</i>)	Qualité du grain	1970, 'Delta'
Weigela (<i>Weigela</i> sp.)	Feuillage panaché	1979, 'Courtatom'
Cerisier (<i>Prunus avium</i>)	Autofertilité	1985, 'Stella'
Forsythia (<i>Forsythia</i> $\times$ <i>intermedia</i>)	Port compact	1985, 'Courtalyn'

dans la variation génétique naturelle. Ils peuvent être activés dans les cellules somatiques sous l'effet de *stimuli* extérieurs, comme cela a été récemment démontré chez le riz, par la culture *in vitro*. Ils ont offert à G. Mendel les variétés de pois à graines ridées de ses premières expériences. Quarante pour cent des variétés actuelles d'espèces fruitières à pépins résultent d'un simple événement de mutation spontanée y compris à partir de variétés récentes.

La mutagenèse induite basée essentiellement sur l'utilisation de radiations ionisantes, et dans une moindre mesure d'agents chimiques mutagènes, a été développée depuis environ 70 ans. Au plan mondial, elle a été utilisée avec succès chez près de 180 espèces et on trouve une multitude de variétés porteuses d'allèles obtenus de cette façon. Une étude de la FAO/IAEA en 2000 a recensé 2 252 variétés issues de mutagenèse induite. En réalité, ce chiffre est très sous-évalué, car dans la plupart des cas, seule la variété directement issue de mutagenèse est indiquée. Le tableau 1 donne quelques exemples de ces variétés. La moitié d'entre elles ont été obtenues durant les quinze dernières années. Ces mutations induites se transmettent par la graine comme n'importe quel caractère héréditaire (cas du riz, par exemple) ou bien ne concernent que certaines couches cellulaires somatiques quand l'espèce est reproduite végétativement.

Il faut aussi signaler quelques rares cas où des variations induites pendant la culture de cellules *in vitro* (variation somaclonale) ont conduit à l'amélioration de certains caractères (*cf.* fiche p. 97).

Production et exploitation de plantes polyploïdes

La polyploïdie, que nous avons définie précédemment comme la multiplication de l'équipement chromosomique de base, peut se produire spontanément du fait d'endomitoses ou, plus généralement par la fécondation entre deux gamètes diploïdes (diplogamètes), résultant de méioses anormales. Ce phénomène n'est pas rare : le dactyle, la luzerne, le poireau et la pomme de terre sont des exemples parmi d'autres d'espèces naturellement (auto)tétraploïdes. Les plantes polyploïdes possèdent des caractéristiques qui peuvent intéresser le sélectionneur comme une augmentation de la taille et de la vigueur. En effet, il existe une

relation entre le contenu en ADN du noyau et le volume de la cellule : pour une même espèce et un type cellulaire donné, la cellule tétraploïde est plus grosse que la cellule diploïde qui est elle-même plus grosse que la cellule haploïde. Par contre, une augmentation du niveau de ploïdie peut entraîner une baisse de la fertilité car l'appariement des chromosomes à la méiose peut être perturbé.

L'action polyploïdisante de la colchicine (substance extraite de la colchique) découverte en 1937 permet d'induire, par traitement des méristèmes avec cette substance, le doublement du stock chromosomique. La triploïdie, qui résulte du croisement d'une plante tétraploïde par une plante diploïde, peut conduire à la stérilité par perturbation de la méiose et empêcher la formation des graines dans les fruits (apryénie ou aspermie). Dans le cas où la graine est indésirable dans le fruit, ce phénomène peut être exploité comme dans le cas de la banane, et de certaines variétés de pastèque, d'agrumes ou de pommier. Chez la betterave sucrière, on cultive des variétés hybrides triploïdes, notamment pour leur rendement élevé en sucre.

Cette méthode a aussi une importance non négligeable dans la réussite et l'exploitation de croisements interspécifiques. Le doublement du stock chromosomique permet d'associer des niveaux de ploïdie équivalents pour rendre compatibles certains croisements. Par ailleurs, le doublement est nécessaire pour rétablir la fertilité des hybrides entre espèces différentes, car il permet de créer des paires de chromosomes homologues capables de s'apparier à la méiose.

Création et exploitation d'hybrides interspécifiques ou intergénériques

Des croisements spontanés entre espèces ont donné naissance à de nouvelles espèces dont certaines sont maintenant cultivées (tabl. 2). Ainsi, les blés sont issus d'additions de génomes à 7 chromosomes de diverses espèces sauvages. Le colza résulte de l'hybridation spontanée entre la navette et le chou tandis que la moutarde brune est un hybride entre la moutarde noire et la navette. Le « triangle » de U (1935) illustre bien ces relations phylogénétiques (fig. 5). Des additions très anciennes et pour lesquelles les espèces parentales n'existent plus, sont aussi à l'origine d'espèces considérées comme diploïdes.

Le premier croisement interspécifique réalisé et recensé par l'homme, a été obtenu en 1719 entre l'œillet des fleuristes (*Dianthus caryophyllus*) et l'œillet de poète (*D. barbatus*). Un peu plus tard, le fraisier moderne à gros fruit (*Fragaria × ananassa*) est apparu en Bretagne où des fraisiers du Chili (mâles stériles) (*F. chiloensis*) étaient cultivés en mélange avec ceux de Virginie (*F. virginiana*). De la même façon, l'introduction en France d'un peuplier, *Populus deltoides*, a conduit spontanément à des hybrides avec *P. nigra* qui ont été ensuite sélectionnés et actuellement, 95 % des variétés de peuplier sont des hybrides interspécifiques. Au XX^e siècle, une nouvelle céréale, le triticale, a été créée et sélectionnée à partir de croisements complexes entre le blé et le seigle. Des ray-grass hybrides entre *Lolium perenne* et *L. multiflorum* produisent des fourrages cumulant les

Tableau 2 — Exemples de création d'espèces par hybridation interspécifique.

1. CRÉATION PAR CROISEMENTS SPONTANÉS		
Espèces impliquées dans le croisement	Nom de l'espèce cultivée obtenue	Date d'apparition ou de diffusion
<i>Triticum urartu</i> × <i>Aegilops</i> Section <i>Sitopsis</i> × <i>Ae. tauschii</i>	Blé tendre (<i>Triticum aestivum</i>)	apparu autour de 6 000 ans av. J.-C.
<i>Gossypium arboreum</i> × <i>G. thurberi</i>	Cotonnier (<i>Gossypium hirsutum</i>)	apparu avant 5 500 ans av. J.-C.
<i>Brassica oleracea</i> × <i>B. rapa</i>	Colza (<i>Brassica napus</i>)	apparu pendant le Moyen Âge.
<i>Fragaria chiloensis</i> × <i>F. virginiana</i>	Fraisier (<i>F.</i> × <i>ananassa</i>)	1740, date d'apparition approximative.
2. CRÉATION PAR CROISEMENTS INTERSPÉCIFIQUES DIRIGÉS PAR L'HOMME		
Espèces impliquées dans le croisement	Nom de l'espèce cultivée obtenue	Année d'inscription au Catalogue officiel et nom d'une variété de l'espèce cultivée obtenue
<i>Populus deltoides</i> × <i>P. nigra</i>	Peuplier hybride	1920, 'I -214', variété de peuplier sélectionnée en Italie qui a été très cultivée en France.
<i>Prunus dulcis</i> × <i>P. persica</i>	Porte-greffe Amandier × Pêcher (<i>Prunus</i> sp.)	1967, 'Amandier × Pêcher GF677', largement diffusé dans le monde depuis.
<i>Vitis vinifera</i> × <i>V. berlandieri</i>	Porte-greffe hybride pour la vigne	1973, 'Fercal', porte-greffe résistant au calcaire.
<i>Lolium perenne</i> × <i>L. multiflorum</i>	Ray-grass hybride (<i>Lolium</i> × <i>boucheanum</i>)	1978, 'Augusta', première variété inscrite au Catalogue officiel français.
<i>Coffea arabica</i> × <i>C. canephora</i>	Caféier Arabusta (<i>Coffea</i> × <i>arabusta</i>)	1980, création au CIRAD.
<i>Prunus domestica</i> subsp. <i>domestica</i> × <i>P. spinosa</i>	Porte-greffe hybride pour l'abricotier	1989, 'Avifel', porte-greffe pentaploïde.

avantages des deux parents. Ils ont été introduits en France depuis la fin des années 1970. L'arabusta, hybride entre *Coffea arabica* et *C. canephora*, a été réalisé pour améliorer la qualité des caféiers cultivés en Afrique. Les rosiers cultivés résultent d'hybridations complexes. Des porte-greffe de vigne proviennent d'hybridation entre *Vitis vinifera* et *V. berlandieri* et, de même, de nombreux porte-greffe d'espèces fruitières résultent d'hybridations interspécifiques ou intergénériques complexes.

Transfert de gènes par hybridation interspécifique

Il s'agit d'une des voies les plus utilisées classiquement pour introduire des caractères de résistance aux bio-agresseurs à partir d'espèces sauvages dans des espèces cultivées aussi différentes que le blé tendre, la tomate, la pomme de

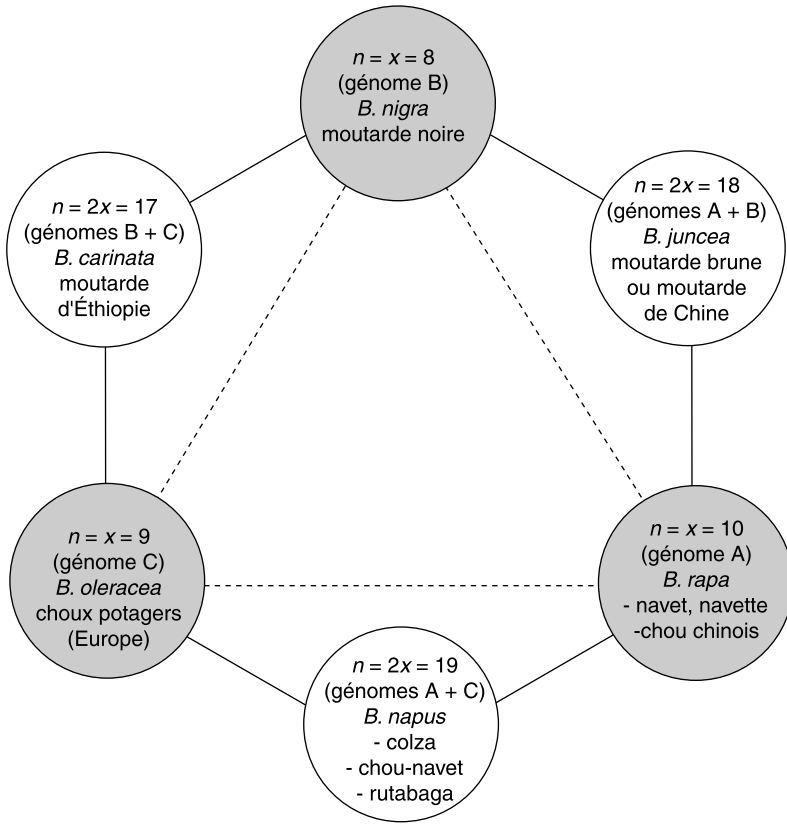


Figure 5 — Phylogénèse des principales Brassicacées (ou Crucifères) cultivées d'après N. U (1935). Les trois espèces diploïdes (en grisé), *Brassica nigra*, *B. oleracea*, et *B. rapa* ont donné par hybridation spontanée entre elles les trois espèces allopolyploïdes (en blanc) : *B. carinata*, *B. juncea* et *B. napus*.

terre, le tournesol, le colza, la betterave sucrière, le melon, le haricot, le piment, la laitue (tabl. 3). Par exemple, dès 1930 le croisement avec *Aegilops tauschii* a permis de transférer la résistance à la rouille noire (*Puccinia graminis*) au blé tendre, *T. aestivum*, ce qui a contribué très largement à la disparition de cette maladie durant une longue période aux États-Unis. Le blé a aussi été croisé avec l'espèce sauvage *Aegilops ventricosa* pour introduire des gènes de résistance au piétin-verse (*Pseudocercospora herpotrichoides*), ou aux rouilles jaune, brune et noire (*Puccinia striiformis*, *P. tritricina* et *P. graminis*, respectivement). Environ la moitié des variétés modernes françaises de blé tendre contiennent des fragments chromosomiques de cette espèce.

Par ailleurs, alors que quelques plantes cultivées peuvent s'hybrider de manière spontanée avec des espèces sauvages et ainsi échanger des gènes (par exemple, le maïs s'hybride facilement avec le téosinte, la betterave sucrière avec les betteraves « sauvages » et le colza avec la navette), dans la plupart des cas, la

Tableau 3 — Exemples de variétés cultivées portant des caractères introduits par hybridation interspécifique.

Nom de l'espèce donneuse	Nom de l'espèce cultivée receveuse	Année d'inscription au Catalogue officiel, nom d'une variété et caractère introduit dans l'espèce receveuse
<i>Triticum timopheevi</i>		1973, 'Maris Hunstman', résistance à l'oïdium (<i>Blumeria graminis</i>).
Seigle (<i>Secale cereale</i>)		1974, 'Clément', résistance à l'oïdium (<i>Blumeria graminis</i>).
<i>Aegilops ventricosa</i>	Blé tendre (<i>Triticum aestivum</i>)	1976, 'Roazon', résistance au piétin-verse (<i>Pseudocercospora herpotrichoides</i>), et résistances aux rouilles jaune, brune et noire <i>Puccinia striiformis</i> , <i>P. trititica</i> et <i>P. graminis</i> , respectivement) et au nématode à kyste (<i>Heterodera avenae</i>).
Ray-grass d'Italie (<i>Lolium multiflorum</i>)	Fétuque élevée (<i>Festuca elatior</i>)	1977, 'Kenhy', appétibilité satisfaisante.
<i>Lactuca serriola</i>	Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	1978, 'Capitan' première variété possédant le gène <i>Dm11</i> de résistance au mildiou (<i>Bremia lactucae</i>).
<i>Lactuca saligna</i>		1990, 'Ninja' première variété possédant le gène <i>Dm16</i> de résistance au mildiou (<i>Bremia lactucae</i>).
<i>Capsicum baccatum</i>	Piment commun (<i>Capsicum annuum</i>)	1991, 'Osir', résistance au virus de la mosaïque du concombre.
<i>Helianthus petiolaris</i> Topinambour (<i>H. tuberosus</i>)	} Tournesol <i>H. annuus</i>	1975, 'Relax', stérilité mâle nucléocytoplasmique.
		1998, 'Inedi', résistance au mildiou (<i>Plasmopara halstedii</i>).

séparation entre espèces est bien réelle et des barrières mécaniques, génétiques, cytoplasmiques ou chromosomiques sont des obstacles sévères à la production, par le sélectionneur, d'hybrides interspécifiques.

Le sauvetage d'embryons *in vitro* a permis d'augmenter les possibilités d'introduction de gènes après croisements interspécifiques. Ainsi, il a, par exemple, été possible d'introduire des caractères de résistances à l'oïdium [*Golovinomyces cichoracearum* (syn. *Erysiphe cichoracearum*) et *Podosphaera xanthii* (syn. *Sphaerotheca fuliginea*)], aux virus de la mosaïque du concombre (CMV), de la mosaïque de la pastèque (WMV) et des taches annulaires du papayer (PRSV-W) chez la courgette (*Cucurbita pepo*) à partir des espèces sauvages *C. lundelliana*, *C. okeechobeensis* et *C. ecuadorensis* et de l'espèce cultivée *C. moschata* (courge musquée).

De même, des résistances au mildiou de la laitue (*Bremia lactucae*) ont été introduites dans la laitue (*Lactuca sativa*) par croisement interspécifique avec

L. saligna. Enfin, l'espèce qui a probablement le plus bénéficié d'introgessions par hybridation interspécifique est la tomate. En effet, les croisements avec des espèces sauvages (*Lycopersicon hirsutum*, *L. peruvianum*, *L. chilense*, *L. pimpinellifolium*, etc.), souvent avec le concours de la culture d'embryons *in vitro*, ont permis de conférer des caractères de résistance à des bactéries, des virus, des champignons, des ravageurs et d'améliorer des caractères agronomiques et de qualité du fruit (tabl. 3). On considère qu'environ 10 % du génome des variétés actuelles de tomate proviennent de ces espèces sauvages.

Hybridation somatique

L'hybridation somatique est une méthode qui permet de réunir, dans une seule cellule, l'information génétique portée par deux cellules somatiques différentes. On la qualifie de somatique par opposition à l'hybridation sexuée, car elle fait appel aux cellules du « soma », c'est-à-dire le sporophyte chez les végétaux. Elle nécessite plusieurs étapes réalisées en laboratoire :

- la digestion des parois pecto-cellulosiques des cellules de feuilles grâce à des enzymes extraites de champignons ou de bactéries qui permet d'isoler ce qu'on appelle des « protoplastes », c'est-à-dire des cellules végétales délimitées seulement par leur membrane plasmique ;
- la fusion des protoplastes grâce à des traitements chimiques (polyéthylène-glycol) ou des décharges électriques ;
- la culture *in vitro* des produits de fusion jusqu'à la régénération de plantes entières.

C'est avec l'idée de créer de nouvelles espèces que l'on a tenté de réaliser ces hybridations qui évitent les barrières des hybridations sexuées. Chez les *Citrus*, de nombreux hybrides interspécifiques et intergénériques ont ainsi été obtenus entre espèces sexuellement incompatibles ; certains sont utilisés comme porte-greffe. On peut aussi, dans certains cas favorables, obtenir l'hybride et éliminer la plus grande partie du génome de l'espèce donneuse par des rétrocroisements. Il s'agit d'une autre méthode pour introduire un caractère d'une espèce dans une autre. De cette façon, par exemple, la résistance au virus de l'enroulement foliaire a été introduite chez la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) à partir de *S. brevidens*, la résistance au mildiou (*Phytophthora infestans*) l'a été de même à partir de *S. bulbocastanum*.

L'hybridation somatique permet de réunir, dans une même cellule, les informations génétiques des deux noyaux, et des deux cytoplasmes provenant des deux parents. L'hybridation somatique est un outil de choix pour réassocier les caractères portés par les organites cytoplasmiques alors qu'ils sont transmis seulement par la plante utilisée comme femelle lors de la reproduction sexuée. On obtient ainsi des « cybrides », plantes dont l'information génétique cytoplasmique provient d'un échange de plastides ou d'une recombinaison de mitochondries entre les parents. Cette méthode a trouvé des applications pratiques, en particulier chez les Brassicacées (ou Crucifères) pour la création de stérilités mâles

nucléo-cytoplasmiques, ces dernières permettant un contrôle total de l'hybridation pour la production de variétés hybrides F_1 .

Transgénèse

Dès le milieu des années 1960, les chercheurs ont essayé de trouver des méthodes de transformation génétique des plantes par introduction directe d'ADN, pour élargir les possibilités d'échange de gènes à l'ensemble des espèces. Ces recherches ont abouti au début des années 1980, grâce aux progrès dans la connaissance des agrobactéries et la mise en évidence de leur aptitude naturelle au transfert d'ADN dans les cellules de plantes. Presque simultanément, des techniques d'électroporation et de « biolistique » ont permis, elles aussi, de transformer des cellules végétales. C'est la construction de gènes permettant enfin une sélection efficace des cellules transformées (résistance à un antibiotique ou à un herbicide) qui a été le facteur décisif du progrès de ces méthodes. Mais, actuellement, on peut produire des plantes transgéniques qui ne contiennent pas de gènes de résistance à un marqueur de sélection (antibiotique ou herbicide). Il est possible, sinon facile, d'obtenir des plantes génétiquement transformées chez toutes les espèces de grande culture.

Huit ans après les toutes premières cultures commerciales, plus de 80 millions d'hectares de plantes génétiquement modifiées (PGM) ont été cultivés en 2004, principalement aux États-Unis, au Canada, en Argentine et en Chine. Les quatre espèces principalement concernées sont le soja, le cotonnier, le maïs et le colza. Les caractères nouveaux introduits dans ces espèces sont des résistances à des herbicides ou à certains insectes. De nombreux programmes se développent avec des cibles plus variées : résistances aux maladies et à d'autres insectes, amélioration des qualités gustatives et nutritionnelles, adaptation aux conditions de milieu défavorables (sel, sécheresse, froid), production de substances diverses, qu'il s'agisse de métabolites ou de protéines d'intérêt thérapeutique.

Méthodes facilitant ou accélérant la création variétale

Haplodiploïdisation

La présence spontanée de quelques rares individus haploïdes (c'est-à-dire ayant le nombre gamétique de chromosomes), parmi les descendants sexués d'un certain nombre d'espèces a été décrite au début du XX^e siècle. Ces individus résultent du développement, sans fécondation, d'un gamète en un embryon, puis une plante. Ils sont le plus souvent d'origine femelle (on parle de gynogenèse *in situ*). Le traitement à la colchicine (ou à l'aide d'autres substances mitoclasiques) permet d'induire le doublement du stock chromosomique des cellules méristématiques. Ces méristèmes peuvent se développer et donner des fleurs fertiles produisant une descendance diploïde (ou haploïde doublée) parfaitement homozygote. Ce processus est équivalent à ce que l'on obtient, imparfaitement, par la succession d'une dizaine d'autofécondations. La mise en pratique d'une

Tableau 4 – Quelques exemples de variétés obtenues par haplodiploïdisation.

Nom de l'espèce améliorée	Date, nom d'une variété et pays
Maïs (<i>Zea mays</i>)	1964, 'Dekalb 640' (États-Unis)
Tabac (<i>Nicotiana tabacum</i>)	1974, 'F211' (Japon)
Colza (<i>Brassica napus</i>)	1976, 'Maris Haplona' (Royaume-Uni)
Riz (<i>Oryza sativa</i>)	1978, 'Lunghua 1' (Chine)
Orge (<i>Hordeum vulgare</i>)	1979, 'Mingo' (Canada)
Blé (<i>Triticum aestivum</i>)	1987, 'Florin' (France)
Asperge (<i>Asparagus officinalis</i>)	1990, 'Andréas' (France)
Piment commun (<i>Capsicum annuum</i>)	1991, un des 2 parents d'"Osir" (France)

méthode efficace d'haplodiploïdisation peut donc conduire à un gain de temps et de moyens pour la fixation des caractères au cours de la sélection.

Pour disposer d'un plus grand nombre d'haploïdes, des méthodes de culture *in vitro* de microspores incluses ou non dans des étamines immatures (on parle d'androgenèse *in vitro*) ou d'ovaires non fécondés (on parle de gynogenèse *in vitro*) se sont développées depuis les années 1960. Ceci a permis d'étendre à un grand nombre d'espèces la production d'haploïdes doublés. Par ailleurs, d'autres méthodes se sont développées comme la pollinisation avec du pollen irradié ou l'utilisation de croisements interspécifiques, suivis ou non du sauvetage des embryons *in vitro*, pour obtenir de telles plantes.

L'utilisation de l'haplodiploïdisation en sélection (haplométhode) est maintenant courante pour l'amélioration de nombreuses espèces comme l'asperge, l'aubergine, le blé tendre, le blé dur, le chou, le colza, le maïs, l'orge, le piment, le riz et le tabac, conduisant à des variétés répandues dans le monde entier (tabl. 4).

Multiplication végétative *in vitro*

Les méthodes de multiplication végétative *in vitro* comprennent :

- le micro-bouturage qui consiste à prélever un fragment de tige comportant un bourgeon (son extrémité ou un nœud) et à le placer en culture en conditions aseptiques sur un milieu nutritif favorisant la production de nouvelles tiges. Ces tiges peuvent, à leur tour, être multipliées de la même façon. La dernière étape consiste à induire l'enracinement des multiples tiges obtenues qui donneront autant d'individus, qu'il sera possible d'acclimater en conditions horticoles ;
- la culture de méristèmes, perfectionnement de la méthode précédente, qui consiste à ne cultiver au départ que le méristème apical de la plante à multiplier, c'est-à-dire un massif cellulaire de quelques centaines de micromètres. Des conditions particulières de milieu sont requises pour qu'un si petit explant se développe et donne naissance à une ou plusieurs tiges ;

– l’embryogenèse somatique qui consiste à obtenir à partir de certains tissus ou organes (cellules du parenchyme foliaire, tissus inflorescentiels, organes reproducteurs, embryons zygotiques immatures) une prolifération de cellules qui reproduisent presque parfaitement les phases de l’embryogenèse zygotique. C’est, en effet, une propriété remarquable des végétaux que la capacité des cellules à perdre leur état différencié et à revenir à un état initial du développement. Des méthodes permettant une certaine synchronisation des cultures aboutissent à la production en très grande quantité d’embryons (des millions par litre de milieu chez le caféier ou certains résineux), puis à leur développement en plantules qui requièrent des modalités précises pour s’établir et croître ensuite en conditions de pépinières horticoles.

Au début des années 1950, la culture *in vitro* de méristèmes, du fait de la restriction à la multiplication virale dans les cellules méristématiques, a permis de régénérer des plants sains à partir de variétés de pomme de terre qui avaient accumulé des virus au cours des multiplications par les méthodes horticoles classiques. La culture *in vitro* de méristèmes a ensuite été appliquée à d’autres espèces à multiplication végétative (vigne, dahlia, fraisier, artichaut, etc.) qui présentaient les mêmes problèmes. Dans le cas des agrumes, l’assainissement est réalisé en associant la thermothérapie (culture à une température supérieure à 33 °C) et le microgreffage *in vitro*. Chez l’ail, autre espèce à multiplication végétative, l’assainissement par culture de méristèmes a permis la création de nouvelles variétés dès les années 1960. Cette sélection sanitaire est un apport remarquable à l’amélioration des plantes.

La multiplication végétative *in vitro* permet d’atteindre des taux de multiplication clonale plus élevés que ceux des méthodes horticoles. Ainsi, on peut obtenir, en un an, par micro-bouturage *in vitro*, 300 000 rosiers à partir d’un seul bourgeon alors que la technique traditionnelle par greffage ne permet d’en obtenir que 30 à 50 en deux ans.

Des espèces des régions tempérées (comme le chrysanthème, le forsythia, l’œillet des fleuristes, le rosier, le fraisier, le kiwi, le framboisier, la pomme de terre, l’asperge), et des espèces des régions tropicales (comme le palmier à huile ou le caféier) bénéficient de la culture *in vitro*, à un stade ou un autre de leur multiplication (en particulier dans les premières phases), le plus souvent associée à une sélection sanitaire.

Connaissance moléculaire des génomes : la « génomique »

Les progrès des techniques de biologie moléculaire, de robotique et d’informatique sont à l’origine du développement de la « génomique » qui aborde la connaissance des génomes sur une grande échelle. On peut définir la génomique comme l’étude exhaustive des gènes, c’est-à-dire :

– leur localisation dans le génome, par le développement de cartes de plus en plus précises, d’abord génétiques, définissant leur position relative sur les chro-

mosomes, puis physiques représentant, à l'échelle de la molécule d'ADN, leur taille réelle et les séquences intergéniques qui les séparent ;

- leur séquence (la succession des nucléotides sur le brin d'ADN) qui permet, dans près de la moitié des cas, d'entrevoir le type de fonction de la protéine correspondante car l'évolution a préservé une étonnante similitude des domaines actifs des protéines ;

- les réseaux de régulation qui coordonnent leur niveau d'expression au cours du développement de l'organisme ;

- leur fonction biologique exacte qui peut être déduite du comportement de mutants chez lesquels les gènes en question sont absents ou ont été rendus non fonctionnels ;

- enfin, la variabilité des caractéristiques précédentes au sein de l'espèce.

Avec ces développements, la biologie moléculaire fournit les moyens d'aborder de façon plus intégrée la réalité du vivant.

Connaissance des génotypes

La première carte génétique partielle du maïs, qui fut publiée vers 1935, n'était constituée que de locus correspondants à des caractères morphologiques. Depuis, chez la plupart des espèces, on développe des cartes génétiques très denses, avec l'ambition d'associer, au même locus, un caractère phénotypique et un marqueur moléculaire. Ces marqueurs moléculaires s'appuient sur des variations de séquences d'ADN, ces dernières ayant supplanté les iso-enzymes (formes enzymatiques variantes) d'abord utilisés. Il existe de nombreux marqueurs moléculaires qui sont très souvent désignés par des sigles : RFLP, RAPD, AFLP, SSR ou microsatellites, SNP, etc. (cf. abréviations, p. 797).

Les premiers séquençages ont porté sur des génomes de petite taille : celui d'*Arabidopsis thaliana* (espèce sauvage de la famille des Brassicacées ou Crucifères), celui du riz et celui du peuplier. La progression très rapide des techniques laisse entrevoir pour un avenir proche (à l'horizon de 10 ans) des bases de données fournissant la séquence complète de la plupart des espèces cultivées.

Une des premières applications du séquençage est l'identification et la localisation sur les chromosomes des gènes qui interviennent sur les différents caractères de la plante.

Marqueurs moléculaires et sélection

La connaissance simultanée de la variabilité moléculaire d'un allèle et de la variabilité de son effet sur un caractère phénotypique permet de concevoir la sélection assistée par marqueurs (SAM). En effet, la construction de génotypes cumulant des formes alléliques favorables pour plusieurs locus et plusieurs caractères devient possible avec le simple recours au marquage moléculaire. On peut aussi concevoir des plans de croisements qui permettent de sélectionner le plus efficacement ces combinaisons. La sélection est donc opérée sur le génotype et non plus uniquement sur le phénotype.

Le cas le plus simple d'utilisation de la SAM concerne l'amélioration d'une variété par le transfert d'un caractère présent dans un autre génotype et gouverné par un seul gène. Ce transfert peut être accéléré si l'on dispose d'un marqueur moléculaire du gène et de marqueurs moléculaires répartis sur le génome de la variété. Ces marqueurs moléculaires permettent de choisir, à chaque génération, les descendants se rapprochant le plus de la variété, tout en s'assurant de la présence du caractère introduit. On accélère ainsi le processus et l'on évite le recours à des tests agronomiques, ce qui représente aussi une économie très appréciable.

Plus complexe est le cas des caractères quantitatifs tels que le rendement qui sont généralement gouvernés par plusieurs locus (*Quantitative Trait Loci* ou QTL). Le sélectionneur devra, en conséquence, accumuler les allèles favorables de ces différents locus. C'est là que la SAM offre le plus d'intérêt par la simplification qu'elle peut apporter face à la complexité de telles situations.

Pour en savoir plus

Académie des Sciences, 2002. *Les plantes génétiquement modifiées*. Rapports sur la science et la technologie, n° 13, 166 p.

Allard R.W., 1960. *Principles of plant breeding*. John Wiley & Sons, New York, 485 p.

Blakeslee A.F. et Avery A.G., 1937. Methods of inducing doubling of chromosomes in plants. *J. Hered.*, 28, 392-411.

Bois D., 1927. *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture*. I. *Phanérogames légumières*. Ed. Paul Lechevalier, Paris, 593 p.

Bois D., 1928. *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture*. II. *Phanérogames fruitières*. Ed. Paul Lechevalier, Paris, 637 p.

Budar F. et Pelletier G., 2001. Male sterility in plants : occurrence, determinism, significance and use. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie*, 324, 543-550.

Charrier A., Jacquot M., Hamon S. et Nicolas D., éd., 1997. *L'amélioration des plantes tropicales*. Collection Repères, CIRAD-ORSTOM, Montpellier, 623 p.

Chase S.S., 1969. Monoploids and monoploid-derivatives of maize (*Zea mays* L.). *Bot. Rev.*, 35, 117-167.

Durand-Tardif M. et Candresse T., 2004. Apport de la génétique à la protection des plantes. *Biofutur*, 242, 16-23.

Gallais A., 1990. *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*. Masson, Paris, 606 p.

Gallais A. et Bannerot H., éd., 1992. *Amélioration des espèces végétales cultivées*. INRA Éditions, Paris, 768 p.

Gallais A., 2003. *Quantitative genetics and breeding methods in autopolyploid plants*. INRA Éditions, Paris, 516 p.

GNIS, 1999. *Les biotechnologies, de nouveaux horizons pour l'amélioration des plantes*. GNIS, Paris, 98 p. et 54 fiches.

Harlan J.R., 1987. *Les plantes cultivées et l'homme*. CILF/ACCT, Paris, 414 p.

Kimber G. et Riley R., 1963. Haploid angiosperms. *Bot. Rev.*, 480-531.

Le Buanec B., 1999. Diversité génétique des variétés de blé tendre cultivées en France au cours du XX^e siècle. Évolution variétale, données techniques et économiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 85(8), 37-59.

- Le Sélectionneur français**, 2002. Association des Sélectionneurs Français : 1962-2002. 40 ans de sélection végétale, 53, 182 p.
- Luciani A.**, 2004. Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture. Étude GEVES, Guyancourt, 187 p.
- Jain M.S., Sopory S.K. et Veilleux R.E.**, éd. 1996. *In vitro haploid production in higher plants. Vol 1 : Fundamental aspects and methods*. Current Plant science and biotechnology in agriculture. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 356 p.
- Morot-Gaudry J.-F. et Briat J.-F.**, 2004. *La génomique en biologie végétale*. INRA Éditions, Paris, 582 p.
- Maluszynski M., Nichterlein K., van Zanten L. et Ahloowahlia S.**, 2000. Officially released mutant varieties – The FAO/IAEA database. *Mut. Breed. Rev.*, 12, 1-84.
- OCDE**, 1993. *Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE Éditions, Paris, 251 p.
- Raynal-Roques A.**, 1994. *La botanique redécouverte*. Belin / INRA Éditions, Paris, 511 p.
- Simmonds N.W.**, éd., 1976. *Evolution of crop plants*. Longman, Londres, 339 p.
- Slinkard A.E. et Knott D.R.**, éd., 1995. *Harvest of gold : The history of field crop breeding in Canada*. University Extension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, 367 p.
- Stewart C.N. Jr, éd.**, 2003. *Transgenic plants : Current innovations and future trends*. Horizon scientific press, Wymondham, 297 p.
- U N.**, 1935. Genome analysis in *Brassica* with special reference to the experimental formation of *B. napus* and peculiar mode of fertilisation. *Jpn. J. Bot.*, 7, 389-452.
- UPOV**, 1961. *Convention internationale pour la protection des obtentions végétales*. Paris, 2 décembre 1961, révisée à Genève, le 10 novembre 1972, le 23 octobre 1978 et le 19 mars 1991. UPOV, Genève, 32 p.
- de Vienne D.**, 1995. *Les marqueurs moléculaires en génétique et biotechnologies végétales*. INRA Éditions, Paris, 200 p.
- de Vilmorin J.-L.**, 1923. *L'hérédité chez la betterave cultivée*. Gauthier-Villars et Cie Éditeurs, Paris, 153 p.

Partie II

Présentation de cinquante plantes cultivées

Guide du lecteur

La seconde partie de ce livre est composée de cinquante fiches, rangées par ordre alphabétique du nom français de la plante cultivée. Elles sont consacrées à :

- des plantes de grande culture : céréales (le blé tendre, le maïs, l'orge, le triticale) ; plantes oléo-protéagineuses (le colza, la féverole, le lin, le pois, le soja, le tournesol) et plantes industrielles : la betterave sucrière (et la betterave fourragère), la chicorée industrielle, la pomme de terre ;
- des plantes forestières : le merisier, les peupliers, le pin maritime ;
- des plantes fourragères : le dactyle pelotonné, la fétuque élevée, la luzerne, les ray-grass, le trèfle violet ;
- des plantes fruitières : l'abricotier, le cassissier, le noisetier, le noyer, le pêcher, le pommier et ses porte-greffe, le poirier et ses porte-greffe poirier et cognassier, les porte-greffe de *Prunus* ;
- des plantes légumières (ou potagères) : l'artichaut, l'asperge, la carotte, la chicorée endive ou witloof, le chou, le fraisier, le haricot, la laitue, le melon, l'oignon, le piment commun, la tomate ;
- des plantes ornementales : le forsythia, l'hortensia, le *Pyracantha*, la tulipe, le *Weigela* ;
- des plantes tropicales travaillées par des Instituts français de recherche : le bananier, les caféiers, l'hévéa ;
- et la vigne et ses porte-greffe.

Ces fiches, construites selon un même plan comprenant sept rubriques et un tableau, présentent des données génériques sur l'espèce, son histoire, les travaux de sélection dont elle a fait l'objet au cours des cinquante dernières années et les perspectives actuelles d'amélioration. Lorsqu'un fait marquant mérite d'être développé, il figure en encadré.

Présentation de l'espèce

La première fois qu'une espèce de plante est citée, son nom latin est précisé. Lorsque celui-ci est indiqué pour la première fois, il est suivi du nom (souvent en abrégé) de « l'auteur de l'espèce » (c'est-à-dire le responsable de la publica-

tion dont l'espèce a fait l'objet). Le nom latin et le nom d'auteur(s) proviennent, notamment, des bases de données en taxonomie :

– *Germplasm Resources Information Network* (GRIN) (USDA, ARS, *National Genetic Resources Program*, États-Unis) consultable à l'adresse :

<http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxfam.pl?language=fr>

– *Mansfeld's World Data Base of Agronomical and Horticultural Crops* (IPK, Gatersleben, Allemagne) consultable à l'adresse :

<http://mansfeld.ipk-gatersleben.de/mansfeld/Query.htm>

– Système d'information taxonomique intégré (SITI) du Gouvernement canadien, consultable à l'adresse : http://www.cbif.gc.ca/pls/itisca/taxaget?p_ifx=scib&p_lang=fr

En ce qui concerne les bio-agresseurs, le nom latin est en général précisé dans la rubrique « Regard sur 50 ans de sélection ». Le nom latin provient pour les agents pathogènes (champignons, bactéries, virus), notamment, de la base de données de pathologie végétale HYP3 (INRA, France) consultable à l'adresse : <http://www.inra.fr/hyp3/>

Données historiques : zone d'origine, domestication, introduction en France et premiers travaux de sélection qui ont eu lieu au cours des siècles.

Information sur l'origine génétique : modifications du génome (variation du niveau de ploïdie, croisements interspécifiques, etc.).

Principales caractéristiques biologiques : durée du cycle biologique, régime de reproduction, mode de pollinisation, possibilités de croisements avec d'éventuelles espèces sauvages voisines.

Collections : localisation et nombre de génotypes présents dans les collections.

Production et utilisation

Le produit récolté : indication botanique de la partie de la plante qui est récoltée.

Production : données quantitatives sur les principaux producteurs mondiaux et sur la production française. Il s'agit principalement de données FAO (2004), recueillies sur le site Internet (adresse : <http://www.faostat.fao.org/>).

Utilisation : utilisations de la plante, formes consommées ou transformées par l'industrie, éventuellement description des étapes principales de la transformation industrielle.

Histoire des variétés cultivées (en France)

Le lecteur trouvera une liste chronologique des principales variétés cultivées qui ont marqué l'histoire de l'espèce en France ou dans le monde s'il s'agit d'une espèce tropicale. Cette liste n'est pas exhaustive et contient des variétés commercialisées (principalement en France, sauf dans le cas des espèces tropicales). Elle comprend aussi des variétés étrangères, lorsque celles-ci ont eu une certaine renommée en France.

Le caractère marquant peut être une avancée méthodologique ou technique, l'introduction déterminante d'un caractère innovant ou un succès commercial.

Cette liste est généralement composée d'une première partie consacrée aux variétés anciennes et d'une seconde aux variétés « récentes » qui ont fait l'objet d'une sélection méthodique (par opposition aux variétés « anciennes »). Elle est éventuellement subdivisée en plusieurs parties dans le cas où l'espèce possède plusieurs types de production correspondant à des utilisations différentes.

Les informations sur les variétés proviennent des catalogues officiels, français ou étrangers (catalogue des Communautés européennes, le plus souvent). Le catalogue officiel français des espèces et variétés comporte plusieurs tomes, établis sur propositions du Comité technique permanent de la sélection des plantes cultivées et arrêtés par le ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation :

- tome 1 : *Plantes de grande culture* (parution annuelle), édité par le GNIS et publié sur le site Internet du GEVES, consultable à l'adresse suivante : <http://www.geves.fr> ;
- tome 2 : *Espèces potagères* (parution annuelle), édité par le GNIS et publié sur le site Internet du GEVES, consultable à l'adresse suivante : <http://www.geves.fr> ;
- tome 3 : *Arbres fruitiers*, édité par le GEVES ;
- et *Variétés et clones de vigne cultivés en France*, édité par l'ENTAV, l'INRA, l'ENSAM et l'ONIVINS.

Pour chaque variété, il est indiqué :

- l'année de diffusion de la variété par l'obteneur ou l'année d'inscription (si elle est connue) au catalogue officiel ;
- la dénomination variétale figurant au catalogue officiel et éventuellement une marque commerciale identifiée par le symbole® sous laquelle la variété est commercialisée ;
- le nom de l'obteneur et son pays. L'obteneur est en général une entreprise et son intitulé légal peut varier dans le temps (par exemple : Vilmorin-Andrieux, Vilmorin, Institut de recherche Vilmorin, Vilmorin S.A.). L'intitulé indiqué de l'obteneur correspond à celui qu'il avait l'année d'inscription de la variété aux catalogues officiels ;
- le type variétal,
- les principales caractéristiques qui en font une variété marquante.

Remarque. Évolution de la variabilité génétique de l'espèce, en particulier au travers de la sélection.

Regard sur 50 ans de sélection

Les premiers paragraphes de cette rubrique relatent les faits marquants et les jalons de l'histoire de l'amélioration de l'espèce en France dans les cinquante

dernières années ou dans le monde s'il s'agit d'une espèce tropicale. Les principaux pays où des travaux d'amélioration sont effectués sont en général précisés.

Caractères importants améliorés : réalisations essentielles de la sélection successivement décrites en expliquant l'intérêt du caractère amélioré.

Difficultés ou obstacles : exemples où des problèmes d'ordre technique ont conduit à des difficultés de réalisation ou d'application.

Méthodes utilisées

Cette partie se présente sous forme d'un tableau où les principales méthodes utilisées en amélioration des plantes (exploitation de phénomènes biologiques, biotechnologies, méthodes de sélection) sont passées en revue. Ce tableau comporte trois subdivisions :

- la première est consacrée aux principales méthodes d'induction de la variabilité ;
- la seconde aux principales méthodes facilitant ou accélérant la création variétale ;
- la troisième énumère les méthodes et schémas de sélection employés, puis les différents types variétaux rencontrés chez cette espèce cultivée.

Dans les deux premières subdivisions, les principales méthodes sont énumérées (dans la partie gauche du tableau) et il est indiqué ce qui a été réalisé (dans la partie droite). Pour chacune des méthodes il est précisé :

- **OUI**, si la méthode a été appliquée à l'amélioration de l'espèce et que cela s'est traduit par au moins une création variétale (une variété est alors citée entre parenthèses) ;
- **ESSAIS**, si des essais d'application sont en cours, mais cela ne s'est pas encore traduit par une création variétale ;
- **AUCUNE**, si aucune application de cette méthode n'est connue pour cette espèce.

Perspectives d'amélioration

Cette rubrique mentionne des faits sur l'avenir de la culture, sur ce qu'il faut encore améliorer, sur les orientations de la recherche et/ou sur les pays où on continue de pratiquer la sélection.

Caractères importants à améliorer : principaux objectifs qu'il reste à atteindre en France ou dans le monde s'il s'agit d'une espèce tropicale.

Techniques à développer : techniques qui ont été mises au point récemment sur l'espèce, en tout début d'application ou qui pourraient être appliquées.

Inscription et protection des variétés (en France)

Information pour l'espèce donnée : existence ou non d'un catalogue, dates d'ouverture des rubriques ou des modifications importantes dans les procédures d'inscription.

Nombre de variétés inscrites au catalogue officiel français et au catalogue européen de 2003. Le catalogue européen est la somme des différents catalogues des 15 états de l'Union européenne (puisqu'avant le 1^{er} mai 2004).

Informations techniques concernant l'inscription (en France) : nombre de caractères morphologiques ou physiologiques utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant le protocole de l'UPOV ou de l'OCVV, durée minimale d'examen de Distinction, homogénéité, stabilité (DHS), possibilité d'Autorisation provisoire de vente (APV) dans le cas des espèces légumières, durée des tests de Valeur agronomique et technologique (VAT) requis dans le cas des espèces de grande culture.

Dans le cas des espèces où il n'y a pas de catalogue, des informations sont données sur la protection des obtentions végétales.

Pour en savoir plus

Cette rubrique rassemble monographies, articles de synthèse et publications scientifiques sur la plante.

L'abricotier

Prunus armeniaca L. ($2n = 2x = 16$)
(Rosacées)

Présentation de l'espèce

L'abricotier, *Prunus armeniaca* L., a d'abord été considéré, dans son centre d'origine chinois, comme une espèce forestière où seules les amandes des fruits étaient consommées (cet usage a perduré jusqu'à nos jours en Chine). Puis, cette espèce s'est diversifiée. Une sous-espèce *Prunus armeniaca* L. ssp. *mume* Siebold & Zucc. s'est développée vers l'est (Japon) où elle a essentiellement été cultivée comme plante ornementale et condimentaire (ce sont les *ume*, qui une fois séchées s'appellent *umeboshi*). Une autre voie de diversification en Asie centrale et occidentale a donné naissance à une population d'abricotiers à fruit qui s'est ensuite développée en Europe et en Afrique du Nord. Les Romains connaissaient déjà l'abricot au début de notre ère, mais il semble qu'il ait fallu attendre l'expansion musulmane pour que de bonnes variétés évoluent dans l'ouest de la Méditerranée. L'abricotier à fruit a été introduit en France au XV^e siècle, mais ce n'est qu'au XVIII^e siècle que sa culture s'est développée. À cette époque, H.-L. Duhamel du Monceau dénombre déjà 13 variétés d'abricot.

L'abricotier est une espèce autogame ou allogame selon les origines, pérenne et multipliée de manière conforme par greffage. L'abricotier est greffé sur semis d'abricotier, de pêcher ou de prunier ou sur des boutures de prunier ou d'hybrides interspécifiques entre ces espèces (cf. fiche p. 639). L'abricotier est susceptible de s'hybrider de manière spontanée avec des pruniers diploïdes, en particulier avec le prunier cerise ou myrobolan (*Prunus cerasifera* Ehrh.) pour donner naissance à des hybrides désignés sous l'appellation « abricotier noir » (*P. × dasycarpa* Ehrh.).

L'aire de culture de l'abricotier est très vaste puisqu'elle va des pays asiatiques à l'Amérique et inclut la majorité des pays européens. Cet arbre fruitier est aussi cultivé dans les zones tempérées de l'hémisphère Sud. Les études phylogéographiques récemment engagées font apparaître que la France se situe aux extrémités d'un

phylum de diversification issu de l'Europe du Nord et d'un phylum d'origine méditerranéenne. Le nombre important de génotypes conservés dans les collections présentes dans le monde laisse supposer que l'abricotier possède une grande variabilité. Les principales collections d'abricotier se trouvent en Ukraine (à Simféropol en Crimée), en Italie (environ 200 génotypes), en France (INRA, environ 400 génotypes), en Turquie et aux États-Unis (environ 100 génotypes). La collection de Simféropol qui contenait plus de 800 génotypes est en forte régression.

Production et utilisation

Le produit récolté, l'abricot, est un fruit charnu, une drupe indéhiscente.

La production mondiale d'abricot dépasse 2,7 millions de tonnes et est répartie dans plus de soixante pays. Plus de la moitié de la production est localisée dans le Bassin méditerranéen (entre 50 et 75 % selon les années). Six pays ont une production qui dépasse 100 000 tonnes : la Turquie (300 000 tonnes), l'Iran (285 000 tonnes), l'Italie (213 000 tonnes), le Pakistan (206 000 tonnes), la France (156 000 tonnes) et l'Espagne (122 000 tonnes) (données FAO, 2004). Depuis plus de 10 ans, la France est devenue un pays exportateur d'abricot.

L'abricot est consommé en frais de début juin à début septembre. Ce fruit est aussi utilisé pour diverses préparations : abricot au sirop, confiture, jus, nectar, coulis, purée, abricot sec et abricot surgelé.

En 2000-2001, environ 640 000 scions ont été commercialisés en France dont moins de la moitié étaient certifiés.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

1830, **'Rouge du Roussillon'**, variété issue d'un semis de hasard. Cette variété produit des fruits tachetés de rouge et de très bonne qualité organoleptique. Cependant, les fruits sont de petit calibre et possèdent une faible capacité de conservation.

1920, **'Bergeron'** (Mme Gabrielle Bergeron, France), variété se caractérisant par de gros fruits à la chair acidulée et de bonne qualité gustative. Cette variété connaît un succès remarquable. En 1998, elle représentait 40 % de la production française.

'Polonais', variété très cultivée se caractérisant par des fruits à chair fragile, mais de bonne qualité gustative. Elle est multipliée et produite depuis plus de 60 ans dans la région du Nyonsais et des Baronnies (Drôme), où le fruit est aujourd'hui commercialisé sous l'appellation d'**'Orangé de Provence'**. Ce n'est pas une variété ancienne française, il s'agit d'une introduction présentant des caractéristiques originales : fruit à chair blanche et à forte teneur en sucre, notamment.

Variétés récentes

1988, **'Bhart'** (université du New-Jersey, États-Unis), variété auto-incompatible produisant des fruits plats de couleur orangé intense, à chair ferme et développant un parfum musqué particulier. C'est une variété adaptée à la moyenne et la basse vallée du Rhône. Cette variété est commercialisée sous la marque Orangered®.

1988, **'Aviera'** (INRA, France), variété très tardive, auto-compatible, régulièrement productive et produisant d'excellents fruits. C'est une variété adaptée au Roussillon. Cette variété est commercialisée sous la marque Helena du Roussillon®.

1989, **'Lambertin n° 1'** (domaine public des États-Unis), variété précoce auto-incompatible produisant des fruits à chair juteuse et de bonne qualité gustative. Cette variété est très sensible à l'enroulement chlorotique de l'abricotier.

1989, **'Avignel'** (INRA, France), variété demi-précoce, auto-compatible, très productive et produisant des fruits d'attractivité moyenne et de bonne qualité gustative. Cette variété est commercialisée sous la marque Mariem®.

1990, **'Goldrich'** (université de Washington, États-Unis), variété auto-incompatible produisant de très gros fruits oblongs et acidulés. Cette variété a été créée en 1954 aux États-Unis.

1991, **'Avikandi'** (INRA, France), variété tardive auto-compatible produisant des fruits excellents. Cette variété est commercialisée sous la marque Gaterie®.

1991, **'Avikloé'** (INRA, France), variété demi-précoce, très bien adaptée aux Pyrénées-Orientales. Cette variété partiellement auto-compatible doit être pollinisée. Cette variété est commercialisée sous la marque Ivresse®.

1991, **'Avikot'** (INRA, France), variété demi-précoce auto-fertile se distinguant par sa rusticité et ses qualités gustatives. Cette variété est bien adaptée à la vallée du Rhône. Cette variété est commercialisée sous la marque Malice®.

1991, **'Avikour'** (INRA, France), variété tardive auto-fertile, de type 'Bergeron', régulièrement productive. Cette variété se distingue par une plus grande adaptation que la variété traditionnelle 'Bergeron' dont elle est issue et par une résistance partielle à l'enroulement chlorotique de l'abricotier. Cette variété est commercialisée sous la marque Fantasma®.

1992, **'Avilor'** (INRA, France), variété tardive, auto-fertile, rustique et produisant de gros fruits. Cette variété est adaptée à la basse vallée du Rhône. Cette variété est commercialisée sous la marque Comedie®.

1996, **'Royal Roussillon'** (INRA / SICA Centrex, France), variété tardive, auto-compatible, régulièrement productive et produisant d'excellents fruits. Adaptée au Roussillon, elle remplace progressivement la variété 'Rouge du Roussillon' avec des fruits de même niveau qualitatif et de calibre supérieur.

1996, **‘Frénésie’** (INRA, France), variété précoce, auto-compatible, régulièrement productive et donnant des fruits de qualité moyenne. Cette variété est adaptée à l’ensemble de la zone méditerranéenne.

1999, **‘Avirine’** (INRA, France), variété partiellement auto-fertile résultant d’une hybridation contrôlée entre une variété d’origine nord-américaine et une variété représentative des populations d’Europe du Nord. Elle rassemble les caractères des deux parents et permet l’émergence d’un type nouveau, où attractivité, qualité organoleptique et adaptation pédoclimatique sont réunies pour la première fois. Cette variété est commercialisée sous la marque Bergarouge®.

2002, **‘Soledane’** (INRA, France / SICA Centrex, France), variété précoce auto-fertile se distinguant par une grande vitesse de mise à fruits, une bonne productivité et par des fruits de fort calibre et de bonne qualité organoleptique pour son créneau de maturité.

Remarque. Les variétés traditionnellement cultivées étaient très typées et inféodées à des régions au contexte cultural bien défini. La diversité des variétés cultivées en France s’est accrue ces dernières années grâce à l’utilisation de fonds génétiques provenant notamment des États-Unis, d’Iran et d’Asie centrale.

Regard sur 50 ans de sélection

L’essentiel de l’amélioration de l’abricotier a été réalisé par les secteurs publics nord-américain et européen, avec une forte contribution française, en raison de la durée nécessairement importante (15 ans) pour la sélection d’une variété d’abricotier et de ses faibles possibilités de développement (dues à une adaptation assez restreinte à de petites aires de culture). Des initiatives privées existent, mais elles restent de portée limitée. L’amélioration a été réalisée par sélection massale ou généalogique et s’est concentrée sur la sélection de variétés adaptées aux différentes zones de culture.

Caractères importants améliorés

Élargissement de la gamme variétale. Il y a 50 ans, la culture de l’abricotier était très régionalisée et la gamme variétale réduite. La sélection a permis de développer pour chaque région une gamme de variétés adaptées. Pour cela, des variétés ayant des périodes très différentes de floraison et de maturité des fruits ont été sélectionnées afin de couvrir le calendrier de production. Il n’existe pas encore une gamme de variétés pour chaque région de production.

Comportement vis-à-vis des maladies

Enroulement chlorotique de l’abricotier (ECA). Cette maladie est causée par un phytoplasme dont le vecteur reste inconnu. Il est donc difficile de lutter contre par des traitements insecticides. Une source de résistance très partielle a été mise en évidence dans la variété ‘Avikour’ Fantasma® se manifestant par un retard d’apparition de la maladie.

Sharka. La sharka ou variole des *Prunus* est une maladie qui met en péril la culture de l'abricotier. Cette maladie est causée par un virus, le virus de la variole des *Prunus* (*Plum pox virus*, PPV) transmis par un puceron sous le mode non persistant (c'est-à-dire que le puceron n'est vecteur de la maladie que pendant une courte période, de l'ordre d'une heure, après l'acquisition du virus). Des variétés nord-américaines telles que 'Stella' ou 'Stark Early Orange' sont résistantes, mais totalement inadaptées aux conditions françaises de culture.

Chancre bactérien. Cette maladie est causée par deux *Pseudomonas* (*P. syringae* et *P. viridiflava*). La variété 'Bakour' est peu sensible à cette maladie.

Qualité du fruit

L'étendue de la variabilité génétique pour les critères liés à la qualité du fruit (sucre, acide, fermeté, couleur, calibre...) et la vitesse d'évolution du fruit au cours de la maturation sont deux enjeux majeurs qui interagissent sur la perception du consommateur. La caractérisation de cette biodiversité et des déterminants génétiques favorisent aujourd'hui leur maîtrise en verger et au sein des programmes d'innovation variétale.

Difficultés et obstacles

Au cours de l'amélioration génétique de l'abricotier en France, une auto-incompatibilité a été sélectionnée involontairement. Pour certaines nouvelles variétés comme 'Lambertin n° 1', 'Bhart', 'Goldrich', 'Avikloé', 'Avirine', il est maintenant nécessaire d'avoir recours à des pollinisateurs intercompatibles avec les variétés devant être pollinisées et présentant une période de floraison analogue.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation des mutations spontanées	OUI 4 variétés issues de mutations spontanées sont inscrites au catalogue officiel français : 'Priboto', 'Boutard', 'Sagold' et 'Charrin'.
Mutagenèse induite	ESSAIS en France Des irradiations au cobalt 60 ont permis d'obtenir des plantes ayant des fruits de maturités différentes, mais celles-ci n'ont pas été exploitées en création variétale. OUI à l'étranger La variété canadienne 'Early Blenheim' (1970), qui se distingue par sa précocité, est issue d'une expérience de mutagenèse.
Croisements interspécifiques	ESSAIS en cours Des essais sont effectués pour créer de nouveaux types de fruits entre prune et abricot, par exemple.

suite...

... suite

Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	ESSAIS Premières plantes transgéniques. La technique a été mise au point sur l'abricotier depuis le début des années 1990. La transgénèse est une opération délicate chez cette espèce, puisqu'il est encore difficile de transformer et régénérer des plantes à partir de tissus adultes. Essais au champ et caractères travaillés. L'absence de sources effectives de résistance à la sharka chez cette espèce a conduit à essayer la transgénèse. Des clones d'abricotier résistants à la sharka ont été obtenus en Autriche à partir de tissus juvéniles par insertion du gène codant pour la protéine capside du virus. Leur intérêt agronomique n'a pas été évalué en France.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Les variétés sont greffées (cf. la fiche p. 639).
Sélection sanitaire	OUI Thermothérapie. L'élimination des virus et des phytoplasmes se fait grâce à cette technique. Microgreffage. Cette technique peut aussi être utile à l'obtention de plants sains en conditions contrôlées, mais elle n'est pas pratiquée en routine en France.
Haploïdisation	ESSAIS La culture d'anthers <i>in vitro</i> et la pollinisation par du pollen irradié sont deux techniques essayées sans succès jusqu'à présent.
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE Une stérilité mâle, dont le déterminisme génétique n'est pas connu, vient d'être mise en évidence chez un hybride interspécifique.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Une auto-incompatibilité a été sélectionnée involontairement dans plusieurs variétés modernes ('Avirine').
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires, notamment des microsatellites, sont utilisés pour caractériser et comprendre la structuration actuelle de la biodiversité. L'identification variétale peut être effectuée grâce à l'usage de marqueurs moléculaires de type AFLP. Des QTL sont en cours d'identification pour certains caractères agronomiques tels que la qualité du fruit, la résistance à la sharka et l'adaptation à une aire de culture.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection dans un semis de hasard. Sélection après un croisement contrôlé.
Types variétaux	Variété clonale : issue de semis de hasard ('Rouge du Roussillon'), issue d'hybridation contrôlée ('Avirine').

Perspectives d'amélioration

Parmi les espèces fruitières et plus particulièrement celles produisant des fruits d'été, l'abricotier connaît actuellement un fort développement, notamment en France. En effet, un marché non saturé, couplé à une offre produit de meilleure qualité, renforce l'attractivité de l'espèce par rapport au pêcher et au pommier dont les marchés sont saturés au niveau européen. Ces perspectives sont renforcées par la multiplicité des usages offerts par le produit dans sa valorisation sur les marchés du fruit frais et de la transformation.

Ces orientations concernent la plupart des programmes d'innovation variétale mis en œuvre par les pays d'Europe de l'Ouest et les États-Unis. Ils sont complétés par des objectifs spécifiques comme le séchage et l'appertisation, notamment en Turquie et en Afrique du Sud.

Pratiquement, les principaux programmes de sélection créatrice sont développés :
 – en Europe, par le CSIC CEBAS à Murcie en Espagne, l'INRA en France, le NAGREF à Naoussa en Grèce, l'ISF de Rome et les universités de Milan et Pise en Italie, l'SCPP à Baneasa en Roumanie, l'université de Lednice en République tchèque ;

– en Amérique du Nord, aux États-Unis par l'USDA et l'université de Davis en Californie et par quelques entreprises privées dont Zaiger Floyd et Bradford Farms ;

– en Afrique du Sud par l'ARC ;

– en Nouvelle-Zélande par le HFRI.

Caractères à améliorer

Élargissement de la gamme variétale. Il est encore nécessaire de créer des variétés à floraison et à maturité précoce ou tardive. En effet, le risque de gel sur fleur est partiellement responsable de l'irrégularité des rendements, mais surtout le faible nombre de variétés adaptées à chacune des régions de production ne permet pas d'apporter aux exploitations une gamme variétale suffisante. Sur le marché, l'élargissement de la gamme et de la période de production devrait renforcer la présence du produit encore faiblement consommé et stabiliser la production.

Adaptation à certaines contraintes de culture. La sélection de variétés nécessitant moins de traitements phytosanitaires et de conduite en verger plus facile est un objectif prioritaire.

Qualité pour le consommateur. Ce critère n'a pas été une priorité des programmes de sélection dans les décennies précédentes. Il est devenu une priorité pour l'INRA qui s'est engagé dans l'étude des déterminants génétiques et physiologiques de la qualité des fruits en s'appuyant sur une espèce modèle à petit génome : la tomate. L'appui de la biologie moléculaire consistant d'une part, en l'identification des QTL impliqués dans la variation de différentes

composantes de la qualité, d'autre part en l'isolement et la caractérisation de gènes intervenant dans l'élaboration de la qualité des fruits, devrait permettre de faire des progrès pour ce critère.

Diversification. La création de variétés d'abricotier produisant des fruits rouges ou blancs est en cours, couplée à une réflexion de la filière sur une démarche de segmentation du produit.

Résistance aux maladies. Des efforts importants de sélection doivent être consentis pour poursuivre l'introduction des résistances aux maladies déjà établies depuis de nombreuses années (la sharka, l'ECA et le chancre bactérien) et aux maladies récemment apparues en France (*Xanthomonas arboricola* pv. *pruni* et *Monilinia fructicola*).

Techniques à développer

Chez une espèce pérenne, telle que l'abricotier, l'usage des marqueurs moléculaires devrait permettre d'accélérer efficacement le progrès génétique. L'introduction par transgénèse de gènes venant d'autres espèces est envisagée pour introduire des résistances à des maladies telles que la sharka.

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture du catalogue officiel des espèces et variétés fruitières du CTPS.

1967, modification, par arrêté ministériel : classes I et II de la rubrique particulière variétés d'arbres fruitiers.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de plantes fruitières destinées à l'exportation.

En 2003, 82 variétés étaient présentes dans le catalogue officiel français. Dans les épreuves DHS réalisées par l'INRA pour le compte du CTPS, du CPOV ou de l'OCVV, des descripteurs morphologiques ou phénologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. À l'issue de cet examen d'une durée minimale de 5 années dont 2 cycles de production significative de fruits, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée des arbres de référence maintenus en collection, permet de juger de la conformité des plants dans le cadre de la certification. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des plants. C'est le CTIFL qu'en a la responsabilité, par délégation du ministère de Tutelle. L'inscription au catalogue officiel est obligatoire pour que la variété puisse entrer dans le système de certification.

Pendant l'hiver 2004-2005, près de 304 000 plants certifiés ont été vendus pour 35 variétés certifiées dont un quart de plants de la variété 'Bergeron'.

Pour en savoir plus

- Audergon J.-M.**, 1995. Variety and breeding. *Acta Hortic.*, 284, 35-45.
- Audergon J.-M., Castelain C., Morvan G. et Chastellière M.-G.**, 1989. Apricot varietal sensibility and genetic variability to apricot chlorotic leaf roll disease. *Acta Hortic.*, 235, 205-213.
- Burgos L., Egea J., Guerriero R., Viti R., Monteleone P. et Audergon J.-M.**, 1997. The self-compatibility trait of the main apricot cultivars and new selections from breeding programmes. *J. Hortic. Sci.*, 72 (1), 147-154.
- Delbard G.**, 1993. *Les beaux fruits de France d'hier et d'aujourd'hui*. Éditions G. Delbard, Paris, 270 p.
- Dicenta F. et Audergon J.-M.**, 1998. Inheritance to Plum pox potyvirus (PPV) in 'Stella' apricot seedling. *Z. Pflanzenzücht.*, 117 (6), 579-581.
- Dosba F. et Lespinasse Y.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.
- Dosba F., Orliac S., Dutrannoy F., Maison P., Massonie G. et Audergon J.-M.**, 1992. Evaluation of resistance to Plum pox virus in apricot trees. *Acta Hortic.*, 309, 211-220.
- Gautier M.**, 1988. L'abricotier. Dans : *La culture fruitière*, tome 2 : *Les productions fruitières*. Tec & Doc, Paris, 292-335.
- Hagen LS., Khadari B., Lambert P. et Audergon J.-M.**, 2002. Genetic diversity in apricot revealed by AFLP markers : species and cultivar comparisons. *Theor. Appl. Genet.*, 105, 298-305.
- Jeannequin B., Dosba F. et Amiot-Carlin M.J.**, coord., 2005. *Fruits et légumes : caractéristiques et principaux enjeux*. INRA Éditions, Paris, 115 p.
- Karayiannis I.**, 1999. Proceedings of the XIth International Symposium on Apricot Culture, Veria-Makedonia I.S.H.S. *Acta Hortic.*, 488 p.
- Laimer M., Da Camara Machado M., Da Camara Machado A., Hanzer V., Weiss H., Regner F., Steinkellner H., Plail R., Knapp E. et Katinger H.**, 1993. Coat protein-mediated protection against Plum pox virus. *Acta Hortic.*, 336, 85-92.
- Lichou J. et Audubert A.**, 1989. *L'abricotier*. Ctifl, Paris, 386 p.
- Lichou J.**, 1998. *Abricot : les variétés mode d'emploi*, guide pratique. Ctifl, Paris, 256 p.
- Louis A.**, 1988. L'abricotier. Dans : *Traité d'arboriculture fruitière*. Le courrier du livre, Paris, 319-323.

L'artichaut

Cynara scolymus L. ($2n = 2x = 34$)
(Astéracées ou Composées)

Présentation de l'espèce

Actuellement, on reconnaît 8 espèces de *Cynara* exclusivement méditerranéennes. Selon toute probabilité, *Cynara cardunculus* L. ssp. *flavescens* Wiklund, répandue dans son bassin occidental est le progéniteur de l'artichaut *Cynara scolymus* L. par augmentation du volume du capitule, et du cardon *Cynara cardunculus* L. subsp. *cardunculus* par élargissement de la nervure centrale de la feuille. Les capitules et les pousses axillaires de divers *Cynara* ont été ramassés de longue date et l'usage survit encore. La domestication, au contraire, est récente et a sans doute eu lieu en Tunisie et/ou au sud de l'Espagne. Le premier témoignage de l'intérêt du capitule d'artichaut date de Columelle, au I^{er} siècle apr. J.-C. Après une éclipse de plusieurs siècles, on doit son renouveau aux Arabes d'Andalousie. L'artichaut a été introduit en France assez tardivement, au début du XVI^e siècle, peut-être à l'occasion des guerres d'Italie. Les deux modes de multiplication, semis et bouturage ont d'abord été tous les deux utilisés, puis le semis a été abandonné progressivement à partir du XVII^e siècle. De Combles, en 1752, dans son ouvrage *L'école du jardin potager*, indique cinq variétés : 'le blanc', 'le vert', 'le violet', 'le rouge' et 'le sucré de Gènes'.

Les peuples méditerranéens l'ont transporté dans de nombreux pays où ils ont migré. Il ne s'est maintenu, de façon significative, que dans des pays au climat proche du climat méditerranéen (nord de l'Argentine, Californie) en raison des exigences de la plante.

L'artichaut est une espèce pérenne, en rosette, craignant le gel et à cycle typiquement méditerranéen. Elle est multipliée traditionnellement par bouturage d'un oeillet (rosette issue d'un bourgeon axillaire et toujours croissante), d'une cabosse (*ovolo* en italien, bourgeon axillaire dont la croissance s'est arrêtée en raison de la sécheresse, il est donc au repos) ou d'un bâton (*palo* en espagnol, bourgeon axillaire qui a évolué jusqu'à la récolte d'un capitule à son extrémité,

puis s'est desséché). L'espèce est allogame par protandrie, le taux de fécondation croisée est donc étroitement lié à l'environnement pollinique. Bien que les croisements entre progéniteurs et l'artichaut soient faciles, les flux de gènes sont plus que réduits, la plante fleurissant rarement en culture et étant encore multipliée végétativement. Cependant, des lots de semences destinés aux amateurs présentent assez souvent des hybrides artichaut × cardon (ce dernier est toujours multiplié par semences). La production de semences des variétés à semer demandera donc des précautions d'isolement pollinique.

La variabilité de l'artichaut est conservée au sein du réseau national de ressources génétiques CYNARA qui regroupe des collections situées dans diverses régions :

- à Plougoulm (Finistère-Nord) : la collection INRA et la banque à long terme de la collection nationale du réseau,
- et sur quatre sites qui sont des banques actives et de secours du réseau :
 - à Torreilles (Pyrénées-Orientales) à la SICA Centrex,
 - à Cavaillon (Vaucluse) au GEVES,
 - à Hyères (Var), en collaboration entre la Chambre d'agriculture d'Hyères et l'Association provençale de recherche et d'expérimentation légumières (APREL),
 - à San Giuliano (Corse) à l'Association régionale des fruits et légumes de Corse (AREFLEC).

Ces collections variétales existent grâce aux programmes de recherche développés dans les stations INRA d'Avignon (Vaucluse) et de Plougoulm. En 1995, sous l'égide du BRG, un réseau national de gestion des ressources génétiques a été mis en place. Ce réseau fonctionne grâce à la volonté de centres expérimentaux. Il constitue une des premières collections mondiales, avec celle de l'université de Bari (Italie).

Production et utilisation

Le produit récolté est un capitule (inflorescence typique d'une Astéracée) avant floraison, composé d'un réceptacle charnu (« le fond d'artichaut ») entouré de bractées imbriquées les unes dans les autres (« les feuilles »).

La production mondiale est de 1,3 million de tonnes et la production française de 56 000 tonnes (données FAO, 2004). Les fluctuations annuelles sont fortes, elles dépendent de la rigueur de l'hiver précédent. La consommation de l'artichaut en France a sensiblement régressé au début des années 1990, elle est maintenant stabilisée.

L'artichaut est un légume consommé :

- à l'état frais le plus généralement cuit, mais parfois cru à l'état jeune, sous forme de capitule entier. Depuis quelque temps, il est aussi commercialisé cru sous forme « prêt à consommer » (artichaut prêt à être cuisiné, présenté en barquette sous cellophane) ;

- après transformation par l'industrie (appertisé ou surgelé) sous forme :
 - de fond, en Bretagne surtout ;
 - de cœur, c'est-à-dire de petits réceptacles à fleurs non développées (sans « foin ») entourés de la partie inférieure des bractées internes et moyennes, en Espagne et en Italie ;
 - de pulpe de la base des bractées de l'involucre.

De même, les jeunes pousses axillaires (ou œilletons) peuvent être consommées. La feuille d'artichaut entre aussi dans la composition d'un apéritif, le « cynar ».

L'artichaut est également une plante médicinale récoltée pour ses feuilles : plusieurs polyphénols en sont extraits dont la cynarine (dérivé phénolique de l'acide caféique), l'ensemble de ceux-ci ayant un effet sur les affections hépatobiliaires et hypercholestérolémiques.

L'artichaut est riche en minéraux (potassium, magnésium, calcium et fer). Le taux important de potassium et la présence d'inuline, glucide de réserve responsable du goût douceâtre du fond d'artichaut, favorisent l'élimination urinaire tandis que les fibres facilitent le transit intestinal. Par contre, il provoque parfois une certaine flatulence. L'artichaut doit, par ailleurs, être consommé rapidement après cuisson car son oxydation génère des composés toxiques.

Enfin, le fourrage d'artichaut et les résidus de culture ou de l'industrie peuvent être consommés par le bétail. Le fourrage d'artichaut est équivalent au foin blanc, avec des rendements beaucoup plus importants (110 à 140 t/ha), mais il est susceptible de donner un goût désagréable au lait. Aussi, n'est-il que peu utilisé (essentiellement pour les veaux). La diminution importante de l'élevage dans les zones de culture contribue à la réduction de son emploi.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Dans la très grande majorité des cas, elles proviennent de la multiplication végétative d'un ou de quelques individus proches, issus d'un semis de hasard. Elles ont été maintenues par sélection massale en éliminant les plantes hors type les plus flagrantes à chaque nouvelle multiplication. Il s'agit donc d'un agrégat de clones très semblables, choisis localement par les maraîchers. Leur nombre a augmenté avec la dispersion des cultures, puis s'est considérablement réduit.

'Gros vert de Laon', variété rustique très cultivée et appréciée en Ile-de-France au XIX^e et au début du XX^e siècle. Elle est citée en 1778 dans les « Soupers de la Cour », mais c'est probablement elle qu'on appelait **'Français'** dès 1596. Elle peut être multipliée à la fois par semis et par œilletonnage. Cette variété n'est pratiquement plus cultivée. À noter qu'il existe aujourd'hui une variété commune en Argentine, dont le nom variétal est 'Francès'. Il se pourrait bien

qu'il s'agisse de la variété 'Gros vert de Laon' que les colons auraient emmenée lors de leur immigration.

'**Blanc**' ou '**Vert de Provence**', variété qui a dominé la production méridionale au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. Sa culture a fortement régressé. Les semences de cette variété ainsi que celles de 'Gros Vert de Laon' ont été utilisées plus fréquemment que les boutures car les plantes obtenues, tout en étant variables, restent à peu près dans le type variétal.

'**Blanc hyérois**', variété précoce, dont le capitule est de forme globuleuse et allongée et de couleur vert pâle, avec parfois des marbrures liégeuses. Elle représente actuellement 60 % de la production méditerranéenne française. Il existe un variant au capitule plus globuleux, appelé 'Pêtre', du nom de M. Pêtre qui l'a découvert.

'**Camus de Bretagne**', variété tardive, à récolte printanière ou estivale dont le capitule est gros, vert glauque et de forme globuleuse. C'est une variété ancienne qui est toujours la plus cultivée. Elle représente 75 % de la production française actuelle (essentiellement en Bretagne). Son fond convient assez bien pour la transformation industrielle.

Il faut signaler que l'appellation « Macau » prête à confusion. En effet, elle signifie que le capitule est globuleux vert et s'applique à deux variétés très différentes : 'Blanc hyérois' dans le Roussillon et 'Camus de Bretagne' dans le sud-ouest de la France.

'**Violet de Provence**', variété précoce à petit capitule violet, ovoïde au printemps et conique en automne et pouvant être consommé crue. Cette variété est très ancienne (des variétés à capitules de ce type sont décrites dès le début du XVII^e siècle).

Variétés récentes

1968, '**INRA VP45**' (INRA, France), variété clone résultant de la sélection clonale pratiquée dans la variété '**Violet de Provence**'. Elle est plus précoce et plus productive en automne que cette dernière et présente un capitule d'un fort calibre. C'est actuellement la seconde variété cultivée en France. On la trouve dans le Midi et également en Bretagne depuis quelques années en production d'été.

1970, '**Caribou**' (INRA, France), variété clone issue de l'hybridation entre deux variétés traditionnelles. Elle se caractérise par un capitule globuleux vert. Elle est plus précoce et plus productive que 'Blanc hyérois', mais elle n'a jamais été très répandue.

1980, '**Jaja-Talpiot**' (INRA, France / université de Jérusalem, Israël), variété de type lignée, multipliée par semences, qui est cultivée en Israël, dans les pays d'Amérique latine et en Tunisie.

1991, '**Salanquet**' (INRA, France), variété hybride F₁ clonée. C'est un hybride cloné car on ne maîtrise pas encore suffisamment la production de semences de qualité à grande échelle d'un hybride F₁.

1991, '**Salambo**' (INRA, France), variété hybride F_1 clonée. Elle est adaptée aux cultures méditerranéennes. Plus précoce que les variétés 'Blanc hyérois' et 'Salanquet', elle est moins vigoureuse que cette dernière et moins productive. Son capitule est violet très foncé, de taille moyenne et de forme subglobuleuse.

1994, '**Orlando**' (Yissum Hebrew University, Israël, commercialisé par Nunhems, Pays-Bas), variété hybride multipliée par semences, inscrite au catalogue européen. La production de semences est basée sur l'utilisation d'une stérilité mâle nucléaire et la pollinisation manuelle jusqu'à présent.

1995, '**Castel**' (INRA, France), variété clone à capitule vert glauque légèrement épineux et de forme globuleuse. Elle a été obtenue après autofécondation de 'Camus de Bretagne' et se caractérise par une très bonne productivité et une très bonne aptitude à la conservation de l'aspect frais (4 à 5 jours de plus que la variété 'Camus de Bretagne'). Cette variété est un succès commercial : elle représente actuellement 30 % des surfaces cultivées en Bretagne.

1999, '**Vertu**' (INRA, France), variété clone. Elle innove par sa précocité dans le type capitule conique vert.

1999 et 2000, '**Calico**' et '**Popvert**' (INRA, France), variétés clones issues de l'hybridation entre lignées. Elles sont adaptées au climat méditerranéen. Tardives, vigoureuses et de production moyenne, ces variétés sont très peu cultivées. Elles ont un capitule globuleux vert avec des bractées larges et bien appliquées.

2000, '**Cric**' (INRA, France), variété clone à capitule violet foncé de forme ovoïde à conique. Plus précoce que 'Salambo', sa vigueur est assez forte et elle assure une bonne production. Le capitule se conserve bien après récolte.

2002, '**Opal**' (INRA, France, commercialisée par Nunhems, Pays-Bas), variété hybride F_1 , multipliée par semences, à capitule conique violet.

Remarque. Si des perspectives de disparition de variétés locales sont à prendre en considération, les risques d'érosion génétique sont faibles tant que la culture de variétés traditionnelles persistera. Ces variétés ont en effet une hétérozygotie importante préservée par la multiplication végétative. Cependant, il faut tenir compte de deux points importants pour l'avenir :

- si la variabilité est seulement conservée sous forme de populations constituées à cet effet et de variétés commerciales multipliées uniquement par semences, cette hétérozygotie a pour conséquence l'impossibilité de retrouver les combinaisons génétiques disponibles dans les variétés anciennes et actuelles, multipliées végétativement. De plus, la diversité allélique disponible dans le matériel maintenu par semences n'a jamais été comparée à celle disponible dans les variétés cultivées. Aujourd'hui, il est donc impossible d'estimer les risques d'érosion génétique en cas de perte de la collection ;

- s'agissant des variétés traditionnelles, conservées par des jardiniers amateurs, il n'existe pas de moyens fiables pour s'assurer qu'elles sont maintenues par ces jardiniers, et pour savoir quelles sont les variétés abandonnées. Ceux-ci peuvent

perdre ou supprimer leurs plantes sans en informer le responsable de la collection nationale. Il est donc logique de considérer que toute variété absente de la collection est potentiellement perdue. Il serait utile de prospecter et de collecter ces variétés.

La variabilité intravariétale a diminué dans la mesure où la sélection clonale a favorisé l'utilisation d'un clone à la place d'un agrégat de clones voisins. Le passage à des variétés hybrides multipliées par semences pourrait, par contre, en élargissant la gamme variétale, permettre d'augmenter à nouveau la diversité génétique cultivée.

Regard sur 50 ans de sélection

Les variétés traditionnelles étaient en harmonie avec le milieu, les techniques agricoles et le marché. La création variétale était donc peu active. Des ruptures d'équilibre d'origines diverses ont induit la nécessité d'amélioration. En 1956, puis à nouveau dans les années 1980, une vague de froid a entraîné la destruction de très nombreuses plantations. Ceci a conduit l'INRA à engager un programme de sélection clonale dans la population 'Violet de Provence', puis en 1958, à commencer la sélection variétale avec le rassemblement d'une collection mondiale et l'étude du système de reproduction afin de maîtriser les autofécondations et les hybridations. Deux programmes ont été lancés :

- l'un orienté vers la création de variétés clones après croisements d'abord entre variétés, puis entre descendances sélectionnées. Il a abouti à des variétés apportant des gains de rendement, de précocité et de qualité du capitule ;
- l'autre, à plus long terme, vers la création de variétés hybrides F_1 reproductibles par semences. Ce dernier programme, unique au monde, a conduit à des géniteurs, qui sont valorisés par un sélectionneur privé néerlandais (Nunhems) à Valencia en Espagne, l'INRA ayant arrêté les travaux de création variétale en 1998.

Les travaux de sélection sur cette espèce sont peu nombreux, y compris en Italie et en Espagne, les deux pays producteurs les plus importants où seuls des programmes de sélection clonale au sein des populations sont conduits.

Caractères importants améliorés

Qualité du capitule et meilleure adaptation aux diverses utilisations. Les programmes de sélection ont intégré cet objectif important qui dépend de nombreux facteurs : le comportement de la plante vis-à-vis des parasites (mildiou surtout, en éliminant le matériel le plus sensible), la vitesse de divergence des bractées, la durée de conservation de l'aspect frais, la tendreté de la base des bractées, le rendement en cœur et en fond pour l'industrie. Le mildiou est causé par une souche de *Bremia lactucae* différente de celles qui attaquent la laitue.

Élargissement de la gamme de produits. Les variétés clones issues de la sélection clonale et de l'hybridation ont été proposées aux producteurs. La mise à

Un fait marquant : la sélection sanitaire

La sélection sanitaire, par culture de méristèmes *in vitro*, permet d'éliminer deux virus des plants d'artichaut : le virus latent de l'artichaut (*Artichoke latent virus*, ALV) et le virus du groupe du flétrissement de la fève (*Broadbean wilt virus*, BBWV). Ces virus, bien que ne provoquant pas en général de symptômes marqués, sont responsables d'une baisse de rendement évaluée respectivement à 20 % et 30 à 40 %. La sélection sanitaire est appliquée aux variétés cultivées en Bretagne depuis 1983. Les plantes assainies sont plus vigoureuses (ce n'est d'ailleurs pas toujours un avantage), elles sont plus précoces, à capitules plus gros et plus nombreux. Même après recontamination, elles conservent pendant deux ou trois ans une supériorité notable, sans doute parce qu'elles ont été aussi débarrassées d'autres parasites que les virus.

disposition de produits nouveaux est toutefois limitée par le circuit commercial qui en bloque parfois le développement. Les variétés hybrides F_1 vont également concourir à cet élargissement. Il faudra en effet créer une gamme de précocité qui se traduira par une gamme de produits différents.

Productivité. L'application systématique de la sélection sanitaire clonale a beaucoup contribué au maintien de la culture (*cf.* encadré ci-dessus). Le passage aux hybrides F_1 permettrait d'exploiter l'importante hétérosis qui a été constatée pour ces variétés hybrides dans la zone méridionale (vigueur et taille de la plante).

Simultanéité des récoltes. Avec les variétés hybrides, la récolte est groupée et donc moins coûteuse. C'est probablement l'un des intérêts des hybrides dans cette espèce. Mais en contrepartie, cela implique de créer une gamme de variétés de précocité différente associée à des façons culturales pour couvrir la période de récolte actuelle.

Simplification de la culture. Le passage à l'utilisation de semences au lieu d'œilletons devrait permettre de mécaniser la culture, surtout au stade du semis et à celui de la plantation. Elle permettra de pallier la diminution de main-d'œuvre et de répondre à l'augmentation des superficies des exploitations.

Difficultés et obstacles

Taux de multiplication. Le taux de multiplication végétative, très faible en conditions horticoles (4 à 5 boutures par plante), fait obstacle à la diffusion rapide des nouveautés. Ce processus horticole concourt au maintien ou à la propagation de certaines affections, dont les virus, et les effets de ces derniers ne sont connus que depuis peu.

Le taux de multiplication par clonage *in vitro* est nettement plus important. Mais, d'une part, son coût est élevé faute d'une organisation pour assurer des multiplications ultérieures et, d'autre part, la fréquence des variants connus mais inopportuns est considérablement augmentée dans les types méditerranéens précoces (*cf.* encadré p. 78).

Multiplication végétative *in vitro* et apparition de variants

La culture de méristèmes *in vitro* peut être utilisée non seulement pour éliminer les virus, mais aussi pour favoriser la diffusion des plants. Mais, avec les variétés du groupe méditerranéen précoce, qui comprend la plupart des variétés utilisées pour la production d'automne et d'hiver ('Violet de Provence', notamment), il apparaît au fur et à mesure des multiplications *in vitro*, des plantes variantes de type *pastel*, avec une fréquence qui atteint rapidement 100 %. Il apparaît aussi quelques plantes variantes de type *bull* et *pastel-bull*. Par comparaison au type normal, le variant *pastel* est plus tardif et ses feuilles sont plus profondément divisées, les variants *bull* et *pastel-bull* ont un capitule plus globuleux, le premier étant de même précocité et ayant des feuilles plus entières, le second étant plus tardif et avec des feuilles plus profondément divisées. Ces variations sont connues par les agriculteurs, car elles apparaissent spontanément en conditions horticoles chez les variétés précoces méditerranéennes. Les variants *bull* et *pastel-bull* sont des variants tétraploïdes, respectivement du type normal et du type *pastel*. La variation *pastel* pose un problème majeur car les plantes sont inaptes à une production d'automne (elles ne montent pas à fleur avant les gelées), mais peuvent convenir pour le printemps, bien que tardives.

Le taux de multiplication sexuée est de plusieurs milliers : une plante produit plusieurs capitules dont certains peuvent contenir un millier de graines (akènes). C'est un atout majeur pour les variétés multipliées par semences. Toutefois, la production industrielle de semences reste difficile avec des rendements faibles et irréguliers en raison de l'utilisation d'une stérilité mâle nucléaire monogénique (celle-ci n'est, en effet, pas toujours stable, d'où un risque d'auto-fécondation) et du faible taux de visite de certains parents par les pollinisateurs (abeilles), ce qui oblige à recourir à la pollinisation manuelle.

Homogénéité. Les variétés hybrides proviennent du croisement de lignées parentales multipliées végétativement (clones). Ces lignées clonées sont relativement homozygotes car elles sont obtenues par autofécondations successives en nombre limité. Avec les variétés hybrides issues de semences, l'homogénéité de la forme et de la couleur du capitule est actuellement légèrement inférieure à celle des variétés clones. Le niveau d'homogénéité ainsi obtenu est suffisant pour le consommateur, mais pour que ces variétés se développent, il faudra qu'elles soient acceptées par le circuit commercial. La variabilité des hybrides actuels est stable (d'une année à l'autre), car les parents sont multipliés végétativement. De plus, on peut penser que l'effet de l'environnement est moindre sur les variétés de semences que sur les variétés clones (les plantes issues de semences « échappent » à l'effet des conditions de milieu sur chaque individu, tandis que les plantes issues de boutures sont « influencées » par l'histoire de la plante-mère dont elles proviennent).

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Des mutants ont été repérés dans les variétés anciennes : ‘Violet du Gapeau’, isolé dans ‘Violet de Provence’, a un capitule plus allongé et d’un violet plus intense tandis que ‘Pêtre’, isolé dans ‘Blanc hyérois’, est plus précoce et son capitule est plus globuleux.
	EN COURS Un variant inerme est apparu dans la variété ‘Castel’. Il sera sans doute à l’origine d’une nouvelle variété.
Mutagenèse induite	ESSAIS Dans les années 1970, il y a eu des tentatives pour induire une stérilité mâle, mais sans succès.
Croisements interspécifiques	ESSAIS Des croisements ont été effectués avec le cardon (<i>Cynara cardunculus</i>) afin d’introduire une bonne ramification et des résistances au <i>Bremia</i>. Ces expériences n’ont pas encore abouti du fait de la difficulté de retrouver une bonne qualité de capitule.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE Les variants tétraploïdes sont spontanés, même si la multiplication <i>in vitro</i> en augmente la fréquence. Ils n’ont, à présent, aucune utilité (cf. encadré ci-contre).
Transgénèse	AUCUNE
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Le bouturage horticole (œilleton, cabosse ou bâton) est le mode traditionnel de multiplication de l’artichaut. La culture <i>in vitro</i> est également utilisée. Cependant, le coût élevé de cette technique fait qu’elle doit être associée à une multiplication horticole améliorée (destruction de l’apex pour favoriser le développement des bourgeons axillaires). Elle ne représente qu’une très faible part des plantations. D’autre part, elle ne peut être appliquée aux variétés méditerranéennes précoces, car il apparaît des plantes variantes avec une fréquence qui augmente rapidement pour atteindre 100 % (cf. encadré ci-contre).
Sélection sanitaire	OUI La culture de méristèmes <i>in vitro</i> est utilisée systématiquement pour l’élimination des virus depuis 1983 (cf. encadré p. 77).
Haploïdisation	ESSAIS La culture de microspores isolées <i>in vitro</i> a permis d’obtenir des embryons gamétiques de quelques cellules seulement. L’utilisation de pollen irradié a permis d’obtenir une plante haploïde, mais le résultat n’a pu être reproduit.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	OUI	Des stérilités mâles nucléaires monogéniques récessives ont été découvertes en 1984. Elles sont utilisées pour obtenir les variétés hybrides 'Orlando' et 'Opal'.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE	
Marquage moléculaire	ESSAIS	Des recherches de marqueurs moléculaires liés à la stérilité mâle monogénique récessive sont en cours.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Semis de hasard. Les variétés traditionnelles en sont issues après un choix de quelques individus plus ou moins proches. Sélection clonale. Cette méthode est utilisée pour l'amélioration des variétés populations oligoclonales anciennes. Isolements de mutants. Des mutants bien visibles sont repérés dans les populations. Ils sont multipliés pour créer de nouveaux clones. ('Pêtré' et 'Violet du Gapeau'). Sélection récurrente. Constitution de populations améliorées obtenues par hybridation de lignées présentant un même type de capitules ; alternances d'autofécondations et d'hybridations au sein de chaque population. Hybridation puis sélection et diffusion de clones. Des croisements sont réalisés et une sélection est effectuée dans la descendance. Les meilleurs sujets sont ensuite multipliés végétativement. Sélection généalogique pour la création de variétés multipliées par semis : – constitution de lignées par autofécondations successives, – recherche des meilleures combinaisons.
Types variétaux	Population oligoclonale (ou agrégat de clones) Variété clone Variété lignée Variété hybride F₁. Le contrôle de l'hybridation est assuré par l'emploi d'une stérilité mâle nucléaire monogénique récessive.

Perspectives d'amélioration

Le développement des variétés hybrides multipliées par semences dépend de la mise au point de techniques fiables de production de graines à l'échelle industrielle. La poursuite des recherches physiologiques permettant d'ajuster les cycles culturaux à la demande est également prioritaire.

Caractères à améliorer

Production de semences hybrides à l'échelle industrielle. La production industrielle de semences reste difficile et limitée. Les lignées parentales porte-graines sont multipliées végétativement. La date de floraison est conditionnée par la date de plantation, l'intensité et la continuité de la phase végétative à venir. Le rendement en semences hybrides est lié de façon déterminante à la simultanéité

de floraison des parents. De plus, les pollinisateurs (insectes) sont peu ou pas attirés par le parent mâle stérile. La quantité et la qualité du nectar des fleurs mâles stériles seraient en cause.

Résistance aux maladies. Des maladies cryptogamiques occasionnant des dégâts au niveau du collet (*Rhizoctonia solani* notamment) et ravageant une partie de la production italienne et espagnole, ou au niveau du feuillage (mildiou et oïdium, ce dernier étant causé par le champignon *Leveillula taurica*) rendent intéressante la perspective de sélectionner des variétés moins sensibles. Les espèces sauvages du genre *Cynara* et le cardon peuvent présenter un intérêt dans la recherche de ces résistances. La sélection par rétrocroisements est toujours complexe et aléatoire quand il s'agit de retrouver la forme récurrente pour un (des) caractère(s) polyfactoriel(s). Par conséquent, le retour au capitule du type de celui de l'artichaut est lent, tandis que la perte de la résistance est fréquente.

Adaptation à la transformation industrielle. Des travaux de sélection importants sont à entreprendre pour améliorer ce caractère qui intègre de nombreux facteurs. Il existe une variabilité importante pour le caractère de teneur en fond (de 6 à 22 % par rapport au poids frais) et pour le cœur, qui doit avoir une partie centrale très dense et blanche.

Techniques à développer

Si l'haploïdisation et le marquage moléculaire se développaient, ils pourraient en particulier aider le sélectionneur pour la reconnaissance des plantes mâles stériles (lors de l'utilisation de la stérilité mâle nucléaire récessive) et pour la recherche de caractères de résistance aux parasites.

La méthodologie pour évaluer le « taux comestible », c'est-à-dire la partie comestible d'un artichaut par rapport à l'artichaut entier, est à mettre au point.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1991, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés d'artichaut.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre annexe des variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 13 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 39 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Une variété d'artichaut a été inscrite en 2000 sur le registre annexe des variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existe une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permet de commercialiser la variété en France.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 51 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. Les observations sont effectuées en première et deuxième années. À l'issue de ces 2 cycles de culture, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre du contrôle des semences et plants de qualité standard. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

- Basnizki J. et Zohary D.**, 1987. A seed-planted cultivar of globe artichoke. *Hortscience*, 22, 678-679.
- Chaux C. et Foury C.**, 1994. Artichaut. Dans : *Productions légumières*, Tec & Doc, Paris, tome 2, 405-438.
- CIHEAM-IAM et Valenzano B.**, 2000. IVth International Congress on Artichoke. Abstracts. October 17-21, 2000. Bari, Italy, Technomac, 108 p.
- Corre J.**, 2003. Artichaut de semis : utopie ou réalité. *Aujourd'hui et demain*, 76, 17-21.
- Dubon G.**, 1997. Artichaut : la dynamique. *Fruits et Légumes*, 153, 24-25.
- Elia A., Calabrese N. et Bianco V.V.**, 1998. Ricerche sulla tecnica colturale e sulle cultivars di carciofo propagato per seme da destinare al consumo fresco et alla surgelazione. *Ann. Fac. Agr. Univ. Bari*, 35, 137-146.
- Foury C.**, 2003. Artichauts et cardons. Dans : *Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 188-201.
- Foury C. et Pécaut P.**, 1988. Quelques aspects du développement de l'artichaut (*C. scolymus* L.). Problèmes posés par la substitution de la reproduction sexuée à la multiplication végétative *C. R. Acad. Fr.*, 74 (5), 85-93.
- Manzanares M.J., Corre J., Le Saint J.-P. et Hervé Y.**, 1993. Effects of artichoke latent virus and broad bean wilt virus isolate FA on components of growth and yield of globe artichoke. *Plant Pathol.*, 42, 378-388.
- Manzanares M.J., Corre J. et Hervé Y.**, 1995. Evaluation of globe artichoke and related germplasm for resistance to artichoke latent virus. *Euphytica*, 84, 219-228.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies de l'artichaut et du cardon. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 493-504.
- Migliori A., Homo E., Corre J., Marzin H., Le Gal V. et Curvale J.-P.**, 1987. Répartition, fréquence et nuisibilité des virus chez l'artichaut en Bretagne. *Rev. hortic.*, 274, 29-36.
- Pécaut P.**, 1994. Les artichauts. *Sauve qui peut*, 6-7, 32-33.
- Pécaut P. et Foury C.**, 1992. L'artichaut. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 460-470.
- Pécaut P., Dumas de Vaulx R. et Lot H.**, 1983. Virus-free clones of globe artichoke (*Cynara scolymus*) obtained after in vitro propagation. *Acta Hortic.*, 131, 303-309.
- Pécaut P., Corre J., Lot H. et Migliori A.**, 1985. Intérêt des plants sains d'artichauts régénérés par la culture *in vitro*. *PHM Rev. hortic.*, 256, 21-26.

- Pécaut P. et Martin F.**, 1993. Variation occurring after natural and *in vitro* multiplication early mediterranean cultivars of globe artichoke. *Agronomie*, 13, 909-919.
- Péron J.-Y.**, 1999. L'artichaut. Dans : *Productions légumières*. Références. Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 128-138.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Principe J.A.**, 1984. Male-sterility in artichoke. *Hortscience*, 19 (6), 864.
- Zohary D. et Basnizki J.**, 1975. The cultivated artichoke *Cynara scolymus*. Its probable wild ancestors. *Econ. Bot.*, 29, 233-235.

L'asperge

Asparagus officinalis L. ($2n = 2x = 20$)
(Liliacées)

Présentation de l'espèce

Des traces de la culture d'asperge (*Asparagus officinalis* L.) datant de 3 000 ans av. J.-C. ont été observées dans les bas-reliefs ou peintures de l'Égypte ancienne. Plus tard, les Grecs préconisent l'usage de cette plante en médecine. L'asperge est alors cultivée en fosses comme l'a décrit le Romain Caton en 161 av. J.-C. Au Moyen Âge, l'asperge est surtout cultivée par les Arabes. Il a fallu attendre la Renaissance pour que la culture de l'asperge soit introduite en France. L'asperge était un mets de choix très apprécié par Henri III, puis plus tard par Louis XIV. J.-B. de La Quintinie, son jardinier, a, le premier, mis au point le forçage sur couches pour servir des asperges au Roi dès le mois de décembre. Il s'agissait alors de la petite asperge commune dont les turions étaient d'un très petit calibre. La « grosse » asperge fut introduite du nord de l'Europe au début du XVIII^e siècle. Au XIX^e siècle, la culture est désormais pratiquée en buttes et ce changement de mode cultural s'accompagne d'une augmentation considérable de la production. L'asperge, alors cultivée dans de nombreux villages autour de Paris, est introduite en Sologne en 1877.

L'asperge est une espèce allogame et dioïque avec 50 % de plantes femelles (*mm*) et 50 % de plantes mâles (*Mm*). Il existe également, mais à une fréquence très faible, des plantes hermaphrodites. Elle est multipliée par semences. Elle est pérenne grâce à sa griffe. Celle-ci, issue d'une graine, est composée d'un rhizome (tige souterraine) qui porte des « yeux » (les bourgeons des futures tiges) à la partie supérieure et des racines à la partie inférieure.

Les oiseaux peuvent transporter des graines d'asperge. C'est probablement une des causes de l'apparition de plantes d'*Asparagus officinalis* sauvage dans des zones non cultivées. Par ailleurs, les plantes de variétés tétraploïdes d'asperge (par exemple, 'Violetta d'Albenga') sont susceptibles de se croiser avec des plantes d'espèces sauvages tétraploïdes (*A. prostratus* Dumort., *A. maritimus* Mill., etc.).

Il ne semble pas y avoir d'efforts importants, aussi bien en France qu'à l'étranger, pour conserver des collections suffisantes d'anciennes variétés populations.

Production et utilisation

Ce sont les jeunes tiges, ou turions, tout juste sorties de terre qui sont récoltées. Elles sont de deux types, selon le mode cultural :

- les asperges sont blanches, si la tige croît dans une butte à l'abri de la lumière. Ce mode cultural est essentiellement pratiqué en Europe. L'usage de paillages en matière plastique s'est développé : paillage transparent pour récolter plus tôt en saison ou paillage noir pour éviter de devoir récolter quotidiennement ;
- les asperges sont vertes, si la culture est pratiquée à plat (la tige contient alors de la chlorophylle).

Une aspergeraie est implantée pour une dizaine d'années.

La Chine et le Pérou dominent largement la production mondiale (6,5 millions de tonnes) avec près de la moitié de leurs productions destinées au marché de la conserve. En 2004, la production d'asperge en France était de 19 500 t (données FAO), ce qui représente une forte régression par rapport à 1990.

L'asperge est consommée à l'état frais, ou après conservation (appertisation ou surgélation).

Histoire des variétés cultivées en France

Les indications de dates antérieures à 1995 correspondent à l'année de diffusion de la variété et non pas à sa date d'inscription au catalogue officiel français, le catalogue asperge ayant été créé en 1995.

Variétés anciennes

Début du XVIII^e siècle : '**Gewone Hollandse**' variété population de « grosse asperge » introduite en France venant des Pays-Bas ou de Pologne. Il s'agissait d'une première amélioration déterminante en raison de la grosseur du turion par rapport à la « petite asperge commune » cultivée jusque-là. Elle est surtout connue sous le nom d'**Asperge violette de Hollande**', mais elle est dite aussi '**d'Allemagne**' ou '**de Pologne**'.

1750, '**Asperge d'Argenteuil**', variété population obtenue par des cultivateurs d'Argenteuil (Val-d'Oise) qui est plus productive et plus hâtive (de dix jours) que l'**Asperge violette de Hollande**'. On distingue l'**Asperge hâtive d'Argenteuil**' et l'**Asperge tardive d'Argenteuil**' selon la précocité. La culture de l'asperge, pratiquée dans les villages proches de Paris tels que Bezons (Val-d'Oise), Épinay-sur-Seine (Seine-Saint-Denis) et Argenteuil, a connu une grande extension à partir de 1800.

1865-1870, '**Asperge améliorée d'Argenteuil**' (familles Lhéault et Lhéault-Salbœuf, Argenteuil, France) variété population à très gros turion, dont l'extrémité est « rose ». Très productive, cette variété a connu un très grand succès commercial.

Avant 1940, '**Martha Washington**' (université de Washington, États-Unis), variété population améliorée sélectionnée, aux États-Unis, dans la variété population 'Asperge d'Argenteuil' pour sa résistance à la rouille.

Variétés récentes

1973, '**Lorella**' (J. Marionnet GFA, France), variété population issue de la population 'Asperge d'Argenteuil' par sélection massale.

1974, '**Diane**' (INRA, France) et '**Junon**' (INRA, France), deux variétés « hybrides dits doubles », se caractérisant par une grande productivité (102 à 160 % des témoins de l'époque), une grande précocité (126 à 356 % des témoins) et un turion de bonne qualité. Ce sont des variétés hybrides dits doubles (croisement entre 4 plantes hétérozygotes).

1975, '**UC-157**' (université de Californie, États-Unis), première variété hybride de clones. Ce type de variétés résulte du croisement entre deux clones hétérozygotes. La culture *in vitro* est employée pour multiplier végétativement les deux parents hétérozygotes. Cette variété adaptée au climat californien, donc aux régions chaudes, est destinée à la production d'asperge verte (qui est pratiquement le seul type d'asperge cultivé en Amérique du Nord) et se distingue par son rendement et la qualité de turion (pointe bien fermée). C'est, probablement encore, la variété la plus cultivée au monde.

1976, '**Larac**' (INRA, France), variété de même type variétal que 'Diane' et 'Junon'. En raison de ses très bonnes performances agronomiques, elle a connu un grand succès commercial.

1977, '**Aneto**', '**Desto**' et '**Cito**' (INRA, France), premières variétés hybrides de clones françaises. Elles présentent une grande productivité (de 107 à 170 % des témoins), une grande précocité (de 146 à 515 % des témoins), une belle qualité de turion et une grande stabilité.

1977, '**Lucullus**' (Sud-Westdeutsche Saatzucht, Allemagne), première variété hybride de clones, 100 % mâle, dont les deux parents sont hétérozygotes et dont le parent mâle est, en outre, « supermâle » (*MM*) et obtenu par autofécondation de plantes hermaphrodites.

1982, '**Backlim**' (Asparagus BV, Pays-Bas), variété hybride de clones, 100 % mâle, de même type variétal que 'Lucullus'. Il a fallu 24 ans pour parvenir à cette variété hybride.

1989, '**Andréas**' (INRA / Darbonne / Vilmorin, France), première variété hybride F_1 , 100 % mâle (*cf.* encadré p. 88). Les deux parents sont d'origine haploïde. Le parent pollinisateur est une plante « supermâle ». Cette variété se distingue par une bonne productivité dans les zones à hiver froid.

Les asperges hybrides F₁ 100 % mâles

Chez l'asperge, d'une part, il existe une importante hétérosis qu'il est intéressant de chercher à exploiter et, d'autre part, la structure hybride F₁ permet d'optimiser l'homogénéité du produit récolté. Par ailleurs, les plantes mâles (*Mm*) d'asperge sont généralement plus productives, plus précoces que les plantes femelles (*mm*), c'est pourquoi des champs composés uniquement de plantes mâles ont toujours été souhaités. Les plantes mâles (*Mm*) ne portant pas de baies, restent beaucoup plus longtemps debout que les plantes femelles en fin de culture, et la reconstitution des réserves est ainsi nettement meilleure. En outre, l'absence de graines évite l'apparition et le développement de jeunes plantules issues de semis dans la plantation. Toutefois, le calibre du turion des plantes mâles est, en général, inférieur à celui des plantes femelles.

Pour répondre à la demande des agriculteurs, l'INRA a lancé un programme à long terme de création de variétés hybrides F₁ 100 % mâles.

Pour la production des parents homozygotes des hybrides, l'haploïdisation a été retenue :

- des plantes haploïdes femelles (*m*) ont été obtenues par polyembryonie (graines contenant deux embryons dont un est haploïde),
- la culture d'anthères *in vitro* (de plantes mâles) a conduit également à des plantes haploïdes, qui sont de deux sortes : les unes femelles (*m*) et les autres (*M*) donnant, après doublement du stock chromosomique, des plantes diploïdes « supermâles » (*MM*). Ces plantes « supermâles » peuvent être clonées *in vitro*.

Un hybride F₁ 100 % mâle (*Mm*) résulte du croisement entre une plante homozygote femelle (*mm*) et une plante homozygote « supermâle » (*MM*).

1988, '**Gijnlim**' (Asparagus BV, Pays-Bas), variété hybride dont le parent mâle est issu d'autofécondations d'une plante hermaphrodite venant de 'Lucullus'. C'est une variété à dominante mâle. Elle possède un rendement très élevé et se caractérise par un progrès dans la présentation visuelle du produit (pointe bien fermée). Elle est cultivée principalement pour la production d'asperge blanche, mais la qualité de sa pointe rend possible son utilisation pour la production d'asperge verte dans certaines régions, ce qui lui a valu un grand développement pour la production d'asperge verte. Par contre, le turion présente le défaut d'être un peu fibreux.

1989, '**Jacq V1**', '**Jacq V2**' et '**Jacq V10**' (J. Marionnet GFA, France), variétés « vitro-clones ». Il s'agit de variétés clones, dont les plants sont produits *in vitro*. Le coût de la production de ce matériel n'étant pas compensé par une amélioration des performances, ce type de variété n'est plus commercialisé.

1995, '**Dariana**' (Darbonne, France) variété hybride de clones, se distinguant par un turion à sommet très pointu.

1996, '**Steinio**' (Helmut Steiner, Allemagne), variété hybride de clones, d'origine allemande, qui a la particularité, comme la variété ancienne 'Alexandre Marionnet' (J. Marionnet GFA, France), d'être dépourvue d'anthocyane. Le turion reste donc blanc, même s'il est récolté un peu tardivement. Mais, ensuite, au lieu de rosir, il verdit. Ce type de variété se développe un peu en France.

1998, '**Filéas**' (INRA / Vilmorin / Darbonne, France), variété hybride F₁, 100 % mâle, obtenue de façon analogue à 'Andréas'. Elle est nettement plus précoce que cette dernière et apporte une amélioration de la qualité de la pointe du turion.

1998, '**Orane**' (INRA / Vilmorin / Darbonne, France), variété hybride F₁ mixte (50 % de plantes femelles et 50 % de plantes mâles). Les deux parents sont issus d'individus haploïdes trouvés dans des graines à plusieurs embryons. Les deux plantes homozygotes, issues du doublement des chromosomes de ces deux plantes, ont été le point de départ de rétrocroisements qui ont permis de créer des plantes mâles quasi isogéniques de ces deux plantes femelles et donc des lignées fixées multipliables par semences. 'Orane' allie précocité, rendement et bonne qualité de la pointe du turion pour la production d'asperge blanche.

2001, '**Dargreen**' (Darbonne, France) variété hybride de clones, spécifiquement sélectionnée pour la production d'asperge verte.

Remarque. La variabilité génétique globale au sein de l'asperge cultivée semble relativement réduite. Les populations semblent dériver d'une population initiale, 'Violet Deutsch' à partir de laquelle deux groupes de populations ont divergé : 'Argenteuil' et 'Ruhm von Braunsweig', les variétés actuelles appartenant à l'un ou l'autre de ces groupes. Par exemple, les variétés hybrides françaises appartiennent au premier groupe tandis que 'Lucullus' appartient au second. Par ailleurs, la variabilité concernant l'adaptation climatique est grande par rapport à ce que la variabilité morphologique laisse supposer.

Regard sur 50 ans de sélection

Les variétés populations avaient un rendement faible et irrégulier et faisaient seulement l'objet d'une sélection massale. Les travaux de sélection menés à l'INRA à partir des années 1960 ont comporté des études de corrélations pour réduire la durée des essais et l'étude systématique de la valeur agronomique de la descendance de croisements hybrides manuels, avec la mise en place d'essais expérimentaux multi-locaux. Ceci a conduit à la diffusion de variétés hybrides dits doubles dans les années 1970 qui ont représenté un bond en avant important en précocité, rendement et qualité. Avec la mise au point de la multiplication végétative *in vitro*, une seconde vague d'hybrides dont les parents sont clonés, a été lancée. Enfin, le programme de recherche engagé à l'INRA sur l'haploïdie dès 1962, a permis d'atteindre l'homogénéité maximale et de tirer le meilleur profit de l'importante hétérosis qui existe chez cette espèce, avec la diffusion dans les années 1990 des premiers hybrides F₁ 100 % mâles ou mixtes, expérimentés en collaboration avec deux sélectionneurs privés.

En Italie, le programme d'amélioration de la recherche publique (*Research Institute for Vegetable Crops*, RIVC, Montanaso Lombardo) est aussi basé sur l'haplo-

méthode. Aux Pays-Bas, la stratégie pour la création de variétés hybrides 100 % mâles a été atteinte d’abord à l’aide d’autofécondations de plantes hermaphrodites, puis par culture d’anthères *in vitro* pour réduire le délai d’obtention.

Caractères importants améliorés

Rendement. L’asperge était une plante cultivée dont la productivité était très faible et dont la qualité de turion était très irrégulière. Les variétés étaient, en effet, des populations génétiquement très hétérogènes. Le rendement, qui était de 1,5 t/ha dans les années 1950-1960 a atteint 6 t/ha avec les variétés obtenues dans les années 1970 (*cf.* encadré ci-dessous).

Précocité. La précocité est un caractère important systématiquement sélectionné car il permet d’exporter de France vers la Suisse et l’Allemagne, gros consommateurs de turions entièrement blancs.

Qualité de présentation du turion. La rectitude et la couleur du turion, la forme compacte de la pointe sont autant de critères de présentation du turion qui ont été pris en compte dans la sélection des nouvelles variétés.

L’hétérogénéité des variétés anciennes

Les variétés cultivées jusque dans les années 1970 étaient des variétés populations, composées d’individus tous différents les uns des autres. Une étude menée par l’INRA dans les années 1960, a montré que la production individuelle était très variable : dans un champ, 25 % des plantes ne produisaient rien, tandis que la moitié du rendement provenait de 10 % des plantes.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D’INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	ESSAIS Il y a eu quelques tentatives de croisements, mais aucune n’a abouti à une création variétale : – <i>A. prostratus</i> × <i>A. officinalis</i> 4n (de type cultivé), – <i>A. maritimus</i> × ‘Violetta d’Albenga’ (variété tétraploïde cultivée).
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Il existe une variété italienne ancienne (connue depuis le XVII ^e siècle) spontanément tétraploïde (‘Violetta d’Albenga’).

suite...

... suite

L'expérimentation de variétés triploïdes ou tétraploïdes n'a pas donné de résultats très convaincants : dans la plupart des essais, s'il est vrai que le calibre des turions des plantes à haut niveau de ploïdie est augmenté, les turions s'avèrent fibreux.

En Allemagne, la Station de Quelindburg a créé des variétés tétraploïdes ('Eros', inscrite en 1989 en Allemagne et radiée en 1992). (À noter que cette variété est différente de la variété diploïde 'Eros' inscrite en 1993 en Italie).

Transgénèse

ESSAIS

1^{re} transformation. L'asperge est la première espèce monocotylédone à avoir été génétiquement transformée (1987).

L'asperge peut être facilement transformée à l'aide d'*Agrobacterium tumefaciens*, mais seuls le gène *GUS* et celui de la résistance à la kanamycine ont été introduits.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative

NON

En conditions horticoles, elle est possible mais très limitée.

OUI

En culture *in vitro*, le microbouturage et la culture de méristèmes donnent de bons résultats. La mise au point de ces techniques a permis de diffuser de nouveaux types variétaux où le clonage d'au moins un parent est nécessaire : parents hétérozygotes d'hybrides de clones ('Aneto', 'Stéline'), parent supermâle des hybrides F₁ 100 % mâles ('Andréas', 'Filéas', 'Sélias') ou l'hybride lui-même dans le cas des « vitro-clones » ('Jacq V1', 'Jacq V2' et 'Jacq V10').

Sélection sanitaire

AUCUNE en France, car le matériel provient de semis. Néanmoins, les plants issus de semis sont élevés selon un schéma de certification sanitaire.

Haploïdisation

OUI

En France, par différentes méthodes pour la création de variétés hybrides F₁ 100 % mâles ('Andréas', 'Filéas', 'Sélias') ou mixtes ('Orus', 'Orane') :

- par polyembryonie : (présence de deux embryons dont un est haploïde) pour l'obtention de lignées fixées,
- par culture d'anthères *in vitro* pour l'obtention de lignées fixées et/ou de plantes « supermâles ».

En Italie, par culture d'anthères *in vitro* pour la création d'hybrides F₁ 100 % mâles ('Eros', 'Marté', 'Italo',...).

Recours à la stérilité mâle

L'asperge étant une espèce dioïque, les plantes femelles sont spontanément mâles stériles.

Recours à l'auto-incompatibilité

AUCUNE

Marquage moléculaire

OUI

Des marqueurs enzymatiques ont été utilisés pour l'identification de clones hétérozygotes et de populations.

Les marqueurs moléculaires devraient permettre, dans un proche avenir, de mieux comprendre le dimorphisme sexuel de l'espèce.

Les marqueurs moléculaires sont utilisés pour fiabiliser la production de semences de certains hybrides, notamment ceux qui sont 100 % mâles.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale dans les populations. Étude de corrélations pour réduire la durée des essais. Recherche des meilleures combinaisons hybrides entre plantes hétérozygotes (et homozygotes) par expérimentations multi-locales. Haplométhode, croisements entre lignées, sélection des meilleures combinaisons. Cycles de sélection récurrente.
Types variétaux	Variété population , c'est le cas de toutes les variétés anciennes. Variété hybride dit double [(clone hétérozygote A × clone hétérozygote B) × (clone hétérozygote C × clone hétérozygote D)] ('Diane', 'Larac',...). Variété hybride de clones (clone hétérozygote A × clone hétérozygote B) ('UC 157', 'Desto', 'Stéline',....). Variété hybride F₁ mâle (composée de 100 % de plantes mâles) ('Andréas', 'Filéas',...). Variété hybride F₁ mixte (50 % de plantes mâles et 50 % de plantes femelles) ('Orus', 'Orane',...). Variété hybride de clones à forte tendance mâle ('Lucullus', 'Gijnlim'). « Vitro-clone » (variété clone) ('Jacq V1', 'Jacq V2' et 'Jacq V10').

Perspectives d'amélioration

La Chine et le Pérou sont devenus les deux premiers producteurs d'asperge. Le coût de la récolte (qui reste essentiellement manuelle) constituant une partie importante des coûts de production, la culture de l'asperge a tendance à se déplacer vers des pays en voie de développement. L'amélioration génétique de cette espèce doit adapter les variétés à ces nouvelles conditions de production. Un rendement élevé reste une nécessité, la résistance aux bio-agresseurs et la qualité de turion étant ensuite les critères les plus importants à prendre en compte.

Une production significative d'asperge pour la consommation en frais demeurera vraisemblablement dans les pays développés, compte tenu du caractère périssable des turions. Pour des raisons de coût de production et d'attrait vers des produits nouveaux, on peut s'attendre à une augmentation de la consommation d'asperge verte dans les pays connaissant jusqu'à maintenant essentiellement l'asperge blanche (France, Allemagne...).

La difficulté d'obtention de turions de fort calibre (préférés en asperge blanche) avec une pointe restant bien fermée en production d'asperge verte fait que, dans les années à venir, des variétés différentes seront vraisemblablement utilisées selon le mode cultural (asperge blanche, asperge verte).

Trois établissements privés français (Vilmorin, Darbonne et Marionnet GFA) poursuivent des travaux de sélection sur cette espèce. Des travaux de sélection sont par ailleurs conduits en Italie, aux Pays-Bas, en Allemagne et aux États-Unis, notamment.

Caractères à améliorer

Rendement. Le rendement demeure le premier critère de sélection et des progrès peuvent encore être faits.

Tolérance aux fusarioses. Les fusarioses, dues principalement à des champignons du sol, *Fusarium oxysporum* et *F. moniliforme*, sont des maladies qui causent d'importants dégâts aux aspergeraies depuis les années 1980. Cependant, l'importance des fusarioses est discutée par certains phytopathologistes qui attribuent ces maladies surtout à des parasites de faiblesse.

Tolérance à la stemphyliose ou « grillure estivale ». Cette maladie d'apparition récente, qui grille la partie aérienne de la plante en période estivale surtout, est provoquée par un champignon *Stemphylium vesicarium*. Elle compromet parfois les rendements de l'année suivante. Il existe d'importantes différences de comportement selon les variétés, dont on pourrait tirer profit.

Adaptation à la production d'asperge verte ou d'asperge blanche. Les variétés les plus récentes sont le plus souvent sélectionnées spécialement pour l'un des deux modes culturels.

Qualité gustative et nutritionnelle. Le goût est pris en compte dans certains programmes d'amélioration génétique. L'amertume et la fibrosité semblent être les caractères principaux sur le plan gustatif. Par ailleurs, plusieurs travaux mettent en évidence les propriétés anti-oxydantes de l'asperge, dues notamment à sa richesse en rutine. Des recherches nord-américaines ont montré la présence chez l'asperge d'une saponine (la protodioscine) à effets bénéfiques pour la santé. Ces travaux ouvrent la voie à une sélection pour une amélioration de la qualité nutritionnelle de l'asperge.

Techniques à développer

L'asperge est une espèce pour laquelle la mise en œuvre d'un grand nombre de techniques telles que le clonage *in vitro*, l'haplodiploïdisation et le marquage moléculaire a grandement contribué à l'innovation variétale.

De nouvelles techniques, comme le marquage moléculaire en vue de la pratique de la sélection assistée par marqueurs, se mettent en place.

L'augmentation de la consommation d'asperge dans le monde est un facteur favorable au développement de ces nouvelles techniques pour la sélection de l'asperge.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1995, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés d'asperge et homologation d'une annexe au règlement technique général d'inscription des variétés de légumes portant modification du catalogue officiel espèces potagères.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre annexe variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 22 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 71 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation jusqu'en décembre 2004, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces légumières à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves de DHS réalisées par le GEVES, 24 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant le protocole de l'OCVV. Pour des raisons de conduite des essais et de gestion de la collection de référence, les essais officiels en France ne sont implantés que tous les 3 ans (2001, 2004, 2007, 2010...). La durée minimale d'examen est de 3 années (l'étude DHS dure en fait 4 années si l'on compte l'année de production de la jeune griffe). Les observations sont effectuées en deuxième année (tige) et troisième année (turion et tige). À l'issue de ces 2 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection à l'obteneur (COV), ce titre lui réservant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Délivré par l'OCVV, il octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Les variétés déposées en 2001 sont beaucoup plus homogènes que celles étudiées lors de l'ouverture du catalogue officiel, en 1995. Les nouvelles variétés sont des hybrides de clones ou des hybrides F_1 et actuellement les variétés populations ne sont plus déposées à l'inscription. La description des variétés est facilitée en raison de l'accroissement de l'homogénéité intravariétale. Par contre, les variétés nouvelles sont plus proches les unes des autres. L'outil statistique appliqué aux caractères, dont on sait par expérience qu'ils varient peu ou pas, aide à distinguer ces variétés, car l'œil humain n'y suffit plus. Lors de l'ouverture du catalogue, des marqueurs enzymatiques ont été utilisés pour essayer de distinguer les variétés. Ces marqueurs ont montré la très grande hétérogénéité des variétés populations (résultats inutilisables pour la distinction) et la relative homogénéité des hybrides F_1 100 % mâles, facilement distinguables à l'époque, car peu nombreux.

Pour en savoir plus

- Adam D. et Stengel B., 1999. *L'asperge, monographie*. Ctifl, Paris, 304 p.
- Bannerot H., Derieux M., Thévenin L. et Arnoux J., 1969. Résultats d'un essai comparatif de populations d'asperge *Ann. Amélior. Plant.*, 19 (3), 289-324.
- Biffi R., Restivo F.M., Tassi F., Caporali A., Marziani G.P., Spada A. et Falavigna A., 1995. A restriction fragment length polymorphism probe for early diagnosis of gender in *Asparagus officinalis* L. *Hortscience*, 30 (7), 1463-1464.
- Bracale M., Caporali A., Galli M.G., Marziani-Longo G., Rossi G., Spada A., Soave C., Falavigna A., Raffaldi F., Maestri E., Restivo F.M. et Tassi F., 1991. Sex determination and differentiation in *Asparagus officinalis* L. *Plant Sci.*, 80 (1-2), 67-77.
- Bytebier B., Deboeck F., De Greve H., Van Montagu M. et Vernalsteens J.-P., 1987. T-DNA organization in tumor cultures and transgenic plants of the monocotyledon *Asparagus officinalis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Genetics*, 84, 5345-5349.
- Corriols L., Doré C. et Rameau C., 1990. 1990 : commercial release in France of Andreas, the first asparagus all-male F₁ hybrid ! (Cobreeding INRA-Darbonne-Vilmorin). *Acta Hortic.*, 271, 249-252.
- Corriols L. et Doré C., 1988. Use of rank indexing for comparative evaluation of all-male and other hybrid types in asparagus. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 113 (2), 328-332.
- Denis J.-B. et Rameau C., 1994. Interpretation of performances of hybrids obtained from 43 asparagus parent genotypes. *Agronomie*, 14, 229-237.
- Doré C., 1974. Production de plantes homozygotes mâles et femelle à partir d'anthères d'asperge cultivées *in vitro* (*Asparagus officinalis* L.). *C. R. Acad. Sci. Paris, série D*, 278, 2135-2137.
- Doré C., 1988. Nouveau regard sur le comportement de l'Asperge (*Asparagus officinalis* L.) multipliée *in vitro*. *Agronomie*, 8 (10), 843-850.
- Doré C., 1990. Asparagus : anther culture and field trials of dihaploids and F₁ hybrids. Dans : *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, vol. 12, Y. Bajaj (éd.), Springer-Verlag, Heidelberg, 322-345.
- Doré C., 2003. Asperges. Dans : *Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord. INRA Éditions, Paris, 180-187.
- Falavigna A., 1983. Recent progress in asparagus breeding by anther culture. *Acta Hortic.*, 131, 215-222.
- Falavigna A., Casali P.E. et Battaglia A., 1999. Achievements of asparagus breeding in Italy. *Acta Hortic.*, 479, 67-74.
- Falavigna A. et Casali P.E., 2002. Practical aspects of a breeding program of asparagus based on *in vitro* anther culture. *Acta Hortic.*, 589, 201-210.
- Geoffriau E., Denoue D. et Rameau C., 1992. Assessment of genetic variation among asparagus (*Asparagus officinalis* L.) populations and cultivars : agromorphological and isozymic data. *Euphytica*, 61, 169-179.
- Gibault G., 1912. Asperge. Dans : *Histoire des légumes*. Librairie horticole, Paris, 3-13.
- Knaflewski M., 1996. Genealogy of asparagus cultivars. *Acta Hortic.*, 415, 87-91.
- Limanton-Grevet A. et Jullien M., 2001. *Agrobacterium*-mediated transformation of *Asparagus officinalis* L. : molecular and genetic analysis of transgenic plants. *Mol. Breed.*, 7 (2), 142-150.
- Mâchon N., Delêtre-Le Boulc'h V. et Rameau C., 1994. Quantitative analysis of sexual dimorphism in asparagus. *Can. J. Bot.*, 73, 1780-1786.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R., 1991. Maladies de l'asperge. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 391-402.
- Pelletier G., Raquin C. et Simon G., 1972. La culture d'anthères d'asperge (*Asparagus officinalis* L.). *C. R. Acad. Sci.*, 274 (6), 848-851.

- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Randall T.E. et Rick C.M.**, 1945. A cytogenetic study of polyembryony in *Asparagus officinalis* L. *Amer. J. Bot.*, 32, 560-569.
- Roux L. et Roux Y.**, 1981. Identification biochimique de clones et lignées d'asperge. *Agronomie*, 1 (7), 541-548.
- Scholten C.T. et Boonen P.H.**, 1996. Asparagus breeding in the Netherlands. *Acta Hortic.*, 415, 67-70.
- Thévenin L.**, 1967. Les problèmes d'amélioration chez *Asparagus officinalis*. I. Biologie et amélioration. *Ann. Amélior. Plant.*, 17 (1), 33-66.
- Thévenin L.**, 1968. Les problèmes d'amélioration chez *Asparagus officinalis*. II. Haploïdie et amélioration. *Ann. Amélior. Plant.*, 18 (4), 327-365.
- Thévenin L. et Doré C.**, 1976. L'amélioration de l'asperge et son atout majeur, la culture *in vitro*. *Ann. Amélior. Plant.*, 26 (4), 655-674.
- Yang H.J. et Clore W.J.**, 1973. Rapid vegetative propagation of asparagus through lateral bud culture. *Hortscience*, 2, 141-143.

Le bananier

Musa L. spp. (surtout $2n = 3x = 33$
mais aussi $2n = 2x = 22$ et $2n = 4x = 44$)
(Musacées)

Présentation du genre

Les premières traces de bananier sont des fossiles, datant de l'ère tertiaire, trouvés en Inde. Le bananier (*Musa* L. sp.) est probablement une des premières plantes qui ait été domestiquée en Asie. Puis, le bananier s'est répandu dans le Pacifique. Il a été introduit en Afrique, d'abord vers 1 000 ans av. J.-C., puis au ^{ve} siècle de notre ère. L'apparition des bananiers en Amérique est couramment imputée à la découverte du Nouveau Monde au ^{XV}^e siècle, mais des hypothèses d'introductions plus anciennes (2 000 ans av. J.-C.) sur la côte ouest de l'Amérique du Sud par les Polynésiens ont été avancées.

Les espèces sauvages diploïdes *M. acuminata* Colla (génome AA) et *M. balbisiana* Colla (génome BB) sont à l'origine de la plupart des bananiers cultivés actuellement. Ces deux espèces sont très fertiles et peuvent se reproduire par graines (voie sexuée) et par rejets (voie végétative).

La domestication a suivi plusieurs étapes et a conduit à la sélection de plantes parthénocarpiques de plus en plus stériles. L'homme aurait commencé à sélectionner des plantes parthénocarpiques, pouvant encore se croiser entre elles mais accumulant progressivement des facteurs géniques de stérilité. La circulation de ces plantes au sein du bassin de diversification (Asie du Sud-Est) a favorisé les hybridations inter- ou intraspécifiques (au sein de *M. acuminata*) pour aboutir à la formation de nouveaux clones diploïdes présentant un fort niveau d'hétérozygotie, notamment d'hétérozygotie structurale (translocations, inversions chromosomiques) avec pour conséquence, un renforcement de la stérilité gamétique de ces clones. La triploïdie, facteur additionnel de stérilité, résulterait du croisement de bananiers à fertilité réduite, porteurs de gamètes non réduits, par des bananiers diploïdes fertiles. La pollinisation de ces plantes triploïdes par des bananiers diploïdes est probablement à l'origine de l'appari-

tion des quelques plantes tétraploïdes spontanées connues. Le bananier se serait ensuite diversifié par voie végétative sous l'effet de mutations spontanées et d'une sélection clonale. La reproduction sexuée a entraîné une structuration des formes cultivées en groupes et sous-groupes. L'utilisation par l'homme de la multiplication végétative de clones stériles a conduit, dans une dernière étape, à la sélection de nombreux mutants contribuant ainsi à l'élargissement de la variabilité phénotypique des bananiers au sein de chaque sous-groupe. Cette variabilité à l'intérieur de chaque sous-groupe est forte au plan phénotypique, mais reste extrêmement réduite du point de vue génétique (elle n'est pas distinguable par marqueurs microsatellites).

En résumé, les bananiers cultivés ne se reproduisent plus que par voie végétative. Ce sont des plantes triploïdes, stériles et aspermes issues de la seule espèce *M. acuminata* (génome AAA) ou issues de croisements interspécifiques entre *M. acuminata* et *M. balbisiana* (génome AAB ou ABB). Le risque de diffusion de gènes des variétés cultivées dans des populations de bananiers sauvages, que ce soit par pollen ou par graine est donc quasi nul.

La culture du bananier pour l'exportation n'a vraiment débuté que vers 1870. À cette époque, L.D. Baker, capitaine de goélette, exportait des bananes jamaïcaines de type Gros Michel vers l'Amérique du Nord. Ce n'est qu'en 1882 que les bananiers du type Cavendish (variété 'Petite Naine') ont commencé à être cultivés aux Canaries pour alimenter le marché européen. En 1915, l'Europe importait déjà plus de 100 000 t de bananes provenant de la Jamaïque. La maladie de Panama a causé une véritable hécatombe dans les bananeraies plantées avec la variété 'Gros Michel' sur le continent latino-américain et dans la zone caraïbe. Repérée dès 1903 au Costa Rica, cette maladie a connu son apogée dans les années 1940. Elle a induit une forte reconversion variétale sur toute cette zone qui ne s'est achevée qu'au début des années 1960, avec la diffusion d'un petit nombre de variétés appartenant au sous-groupe Cavendish et résistantes à cette maladie.

Une bananeraie menée en conditions intensives a une durée d'exploitation limitée en raison de la baisse de fertilité biologique et chimique des sols ; elle devra alors être replantée tous les 4 à 6 ans. Elle peut cependant être conduite en système pérenne, pendant 40 à 50 ans (et parfois plus de 100 ans, comme en Ouganda), dans des conditions écologiques favorables.

Le bananier est cultivé dans 120 pays des zones tropicales et sub-tropicales, répartis sur les cinq continents (tabl. 5). La majorité des variétés de bananier existantes reposent sur seulement 5 à 6 fonds génétiques prédominants, ce qui montre une très grande souplesse d'adaptation de ces génotypes à des conditions de culture très variées. La conjonction d'une propagation végétative facile et de l'aspermie (qui a rendu le fruit comestible) a généré une grande vulnérabilité de la culture bananière en raison de l'étroitesse de la base génétique des variétés cultivées. De plus, la diversité des bananiers s'érode fortement dans le centre d'origine du fait du développement des activités humaines.

Cependant l'*International Network for the Improvement of Banana and Plantain* (INIBAP) qui gère la recherche internationale et qui est placé sous l'autorité de l'IPGRI, veille à ce que les ressources génétiques soient conservées.

Production et utilisation

Le bananier est une herbe géante pouvant atteindre 15 mètres. Le produit récolté, la banane, dont quelques dizaines sont rassemblées en un régime, est une baie, fruit indéhiscant, asperme. Cette absence de graines provient de la stérilité des variétés cultivées qui résulte de facteurs géniques (dont les mutations), de facteurs génétiques (remaniements de segments de chromosomes, interspécificité) et de la triploïdie.

La production mondiale de banane atteignait 71 millions de tonnes en 2004. Les principaux pays producteurs sont l'Inde (16,8 millions de tonnes), le Brésil (6,6 millions de tonnes), la Chine (6,4 millions de tonnes), l'Équateur (5,9 millions de tonnes) et les Philippines (5,6 millions de tonnes). La production bananière à la Guadeloupe (123 000 tonnes) et à la Martinique (300 000 tonnes) est à la base de l'économie rurale de ces îles avec la canne à sucre. La production globale de la Guyane et de la Polynésie française dépasse 5 000 tonnes (données FAO, 2004). Le bananier est la quatrième plante la plus importante pour l'alimentation humaine dans le monde après le riz, le blé et maïs.

Environ 14 % des bananes produites dans le monde sont destinées à l'exportation vers l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon. Ces bananes appartiennent en quasi-exclusivité au type Cavendish. Une multitude de variétés sont, par contre, cultivées pour alimenter les marchés locaux des pays producteurs.

La banane peut être consommée sous forme de fruit frais (les types Pome et Figue-Pomme au Brésil, Mysore et Pome en Inde et Satama en Afrique de l'Ouest sont des exemples de bananes douces ou à dessert), de légume cuit (les types Plantain en Afrique, Bluggoe en Inde) ou de bière (type Ljugira en Afrique de l'Est).

Histoire des variétés cultivées dans le monde

Les premières variétés dites variétés naturelles étaient des variétés ancestrales trouvées dans la nature, puis cultivées. Elles se sont ensuite diversifiées, au plan phénotypique, par multiplication végétative, sous l'action de l'homme (sélection clonale) qui les a exploitées.

Variétés anciennes, déjà cultivées avant le ^{xx}e siècle

'Fraysinette', 'Figue sucrée', exemples de variétés à dessert du sous-groupe Sucrier se distinguant par un goût très sucré. Les variétés de ce type sont diploïdes (AA) et sont cultivées sur tous les continents.

Tableau 5 — Classification et répartition géographique des principales variétés.

Groupe	Sous-groupe	Variétés cultivées	Type de fruit	Distribution géographique
AA	Sucrier	Pisang Mas/Frayssinette/ Figue sucrée	dessert-sucré	Tous continents
		Pisang Lilin	dessert	Indonésie/Malaisie
		Pisang Berangan/Lacatan	dessert	Indonésie/Malaisie/Philippines
AAA	Cavendish	Lacatan/Poyo/Williams/ Grande Naine/Petite Naine	dessert	Tous continents, pays exportateurs
	Gros-Michel	Gros-Michel/Highgate/ Cocos	dessert	Tous continents
	Figue-Rose	Figue-Rose rose/Figue- Rose verte	dessert	Tous continents
	Lujugira	Intuntu/Mujuba	à bière/à cuire	Afrique de l'Est et centrale, Colombie
	Ibota	Yangambi km5	dessert	Indonésie/Afrique
AB	Ney Poovan	Safet Velchi/Sukari	dessert-acidulé	Inde/Afrique de l'Est
AAB	Figue-Pomme	Maça/Silk	dessert-acidulé	Tous continents
	Pome	Prata	dessert-acidulé	Inde/Malaisie/Australie/ Afrique de l'Ouest/Brésil
	Mysore	Pisang Ceylan	dessert-acidulé	Inde
	Pisang Kelat	Pisang Kelat	dessert	Inde/Malaisie
	Pisang Rajah	Pisang Rajah Bulu	à cuire	Malaisie/Indonésie
	Plantain	French/Corne/Faux Corne	à cuire	Afrique centrale et de l'Ouest/ Amérique latine/Caraïbes
	Popoulou	Popoulou	à cuire	Pacifique
	Laknao	Laknao	à cuire	Philippines
	Pisang Nangka	Pisang Nangka	à cuire	Malaisie
	Bluggoe	Bluggoe/Matavia/Poteau/ Cacambou	à cuire	Tous continents
ABB	Pelipita	Pelipita	à cuire	Philippines/Amérique latine
	Pisang Awak	Fougamou	dessert	Inde/Thaïlande/Philippines/ Afrique de l'Est
	Peyan		à cuire	Philippines/Thaïlande
	Saba	Saba	à cuire	Philippines/Indonésie/Malaisie

‘**Gros Michel**’, variété de bananier à dessert du sous-groupe du même nom, cultivée sur tous les continents, destinée principalement à la production de bananes d’exportation durant la première moitié du XX^e siècle avant d’être

décimée par la maladie de Panama. Cette variété rustique produit un fruit très robuste et de bonne qualité gustative. Ses principaux défauts sont surtout sa sensibilité à la maladie de Panama et sa grande taille qui interdit la plantation à haute densité et rend difficile les traitements foliaires. Cette variété a, depuis, été remplacée par des variétés du sous-groupe Cavendish.

‘Petite Naine’, ‘Grande Naine’, ‘Lacatan’, ‘Poyo’ et ‘Williams’, variétés du sous-groupe Cavendish. Avec plus de 40 % de la production mondiale (42 millions de tonnes), les variétés de ce sous-groupe, originaires du sud de la Chine, fournissent la quasi-totalité des bananes destinées à l’exportation (13 millions de tonnes); elles sont aussi très présentes sur les marchés intérieurs des pays du Sud. Ce sont des variétés triploïdes (AAA) cultivées dans un mode monoculturel et intensif. ‘Petite Naine’ était déjà présente au ^{XV}^e siècle aux Canaries. ‘Grande Naine’ et ‘Williams’ sont des bananiers de taille intermédiaire qui se distinguent par leur grande productivité. Le fruit est plus fragile que celui de la variété ‘Gros Michel’ et est de goût neutre.

‘Intuntu’, ‘Mujuba’, exemples de variétés du sous-groupe Lujugira (AAA). Ce sont des variétés de bananier de banane à cuire et à bière, spécifiques de l’Afrique de l’Est.

‘Figure rose’, variétés du sous-groupe du même nom (AAA) à dessert, cultivées aux Philippines, dans le Pacifique et aux Antilles.

‘Sukari’, ‘Safet Velchi’, variétés du sous-groupe Ney Poovan (AB) qui se distinguent par la production de bananes acides à dessert. Ces variétés sont cultivées dans l’Inde et l’Afrique de l’Est.

‘Maça’ et ‘Silk’, variétés du sous-groupe Figue-Pomme (AAB). Elles produisent des bananes à dessert au goût doux et acidulé. Elles sont cultivées sur tous les continents.

‘Prata’, variété du sous-groupe Pome (AAB) cultivée sur de nombreux continents et produisant des bananes à dessert au goût acidulé.

‘Corne’, ‘Faux corne’ et ‘French’, variétés du sous-groupe Plantain (AAB). Elles sont cultivées en Afrique, en Amérique latine et dans la Caraïbe (17 millions de tonnes dans le monde). Les bananes se caractérisent par une pulpe jaune orangé très ferme à maturité. Elles sont consommées en fruits « verts » ou « jaunes » après cuisson. Ces variétés sont résistantes aux races 1 et 2 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*.

‘Fougamou’, variété du sous-groupe Pisang Awak. Cette variété, cultivée en Asie et en Afrique de l’Est, produit des bananes à dessert.

Variétés récentes obtenues par sélection clonale

1983, **‘Mbouroukou n° 1’** (Cameroun), exemple de clone naturel qui a été multiplié et diffusé largement après caractérisation. C’est un bananier du sous-groupe Plantain qui est originaire du Cameroun et qui a révélé des caractéristiques agronomiques intéressantes aux Antilles et en Colombie.

1992, '**Tai-Tchiao n° 1**' (Taiwan Banana Research Institute, Taiwan), variété du sous-groupe Cavendish obtenue par variation somaclonale, résistante à la maladie de Panama race 4 qui a permis de relancer la culture du bananier pour l'exportation, dans certaines zones de production taiwanaise. Son intérêt est cependant limité par ses faibles performances agronomiques.

1993-2003, '**Zélig**' (Rahan Meristem, Israël, 1993), '**IRFA902**' (Vitropic, France, 1993), '**Galil**' (Galiltec, Israël, 2002), '**MA13**' (Vitropic, France, 2003), variétés issues de sélection clonale en plein champ de 'Grande Naine' (AAA) (sous-groupe Cavendish) développées par les producteurs-semenciers de vitropplants de bananier présentant des différences agronomiques sensibles par rapport à la variété 'Grande Naine' (AAA) de référence : plus grande précocité, meilleure productivité, plus grande conformité des régimes, amélioration de l'homogénéité des fruits et tendance moindre à la production de variants somaclonaux.

Variétés récentes obtenues par hybridation sexuée

1992, '**IRFA914**' (CIRAD, France), variété triploïde obtenue par croisement interspécifique entre *M. acuminata* et *M. balbisiana* (AAB) se distinguant par des résistances aux bio-agresseurs et des caractéristiques agronomiques remarquables. Le développement de cette variété est cependant arrêté du fait de l'intégration dans le génome de *M. balbisiana* de séquences latentes de badnavirus susceptibles de s'activer pour former des particules virales épisomales sous l'effet de stress environnementaux (froid, sécheresse) ou lors du passage par la culture *in vitro*. Ces particules virales sont létales pour le bananier. Ces séquences intégrées, spontanément présentes dans le génome de *M. balbisiana* ne semblent pouvoir s'activer et causer des effets délétères que lorsque celui-ci est placé dans un fond génétique de type *M. acuminata*.

1994, '**Goldfinger**' (FHIA, Honduras), variété tétraploïde de bananier à dessert (AAAB) se caractérisant par des résistances à la maladie des raies noires, à la cercosporiose jaune, à la maladie de Panama (races 1 et 4) et au froid. Cette variété est issue du croisement entre un Prata nain ('Ana') et une variété diploïde améliorée ('SH3142'). Cette variété est plantée dans des zones où la maladie de Panama interdit la culture des variétés traditionnelles. Cette variété contient des séquences intégrées du badnavirus dans le génome de *M. balbisiana* qui ne semblent pas être activables.

1995, '**FHIA20**' et '**FHIA21**' (FHIA, Honduras), exemples de variétés tétraploïdes de type 'Faux corne' (Plantain) résistantes à la maladie des raies noires. Ces variétés sont cultivées à grande échelle au Honduras et à Cuba. Le fruit est de qualité acceptable, mais toutefois inférieure à celle des variétés traditionnelles du sous-groupe Plantain. La variété 'FHIA 21' contient des séquences du badnavirus sujettes à activation pour former des particules virales dans certaines circonstances de multiplication ou de culture.

1996, '**IRFA916 à 921**' (CIRAD, France), variétés triploïdes monospécifiques (AAA), rustiques, productives, résistantes aux maladies foliaires et produisant un fruit de taille variable de qualité de type export. Les plantes sont cependant de trop grande taille pour former des bananeraies à haute densité. Des projets, basés sur l'utilisation de la mutagenèse induite et la sélection clonale, visent à corriger ce défaut. Certaines de ces variétés ont reçu un accueil favorable lors de tests de consommation en France. De nouvelles variétés issues des mêmes schémas de croisements sont en cours d'évaluation.

Remarque. À l'heure actuelle, près de 80 % de la production mondiale de banane dessert et 100 % des bananes exportées reposent sur les variétés du sous-groupe Cavendish qui dérivent toutes les unes des autres par multiplication végétative. Il en est de même pour les bananes à cuire pour lesquelles le seul sous-groupe des plantains représente près de 40 % de la production mondiale.

Regard sur 50 ans de sélection

Créer et sélectionner des nouvelles variétés par des schémas traditionnels est fastidieux chez le bananier du fait de la complexité des génomes (polyploïdie), de la stérilité qui induit des difficultés pour réaliser des croisements et du peu de connaissances des déterminismes génétiques des caractères agronomiques importants. Ces difficultés expliquent pourquoi l'amélioration du bananier a longtemps reposé, et repose encore, sur une simple sélection de mutants présentant des caractères agronomiques favorables. Par contre, aucune résistance aux cercosporioses et aux nématodes n'a été obtenue par cette voie jusqu'à présent.

La réalisation de croisements n'a vraiment débuté que dans les années 1920 pour conférer à la variété 'Gros Michel' une résistance à la maladie de Panama. La première stratégie employée a été de croiser des bananiers triploïdes avec des bananiers diploïdes afin de produire des variétés tétraploïdes. Cette stratégie a été réutilisée ensuite pour introduire la résistance à la maladie des raies noires aux bananiers à fruits à cuire. Beaucoup plus tard, à la fin des années 1980, une autre stratégie a consisté à produire des variétés triploïdes en croisant des clones diploïdes-doublés (tétraploïdes) avec des génotypes diploïdes (*cf.* encadré p. 104).

Plusieurs centres importants de recherche s'intéressent à la sélection du bananier. L'*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca – e Fruticultura Tropical* (EMBRAPA-CNPMF) au Brésil s'occupe de l'amélioration des types variétaux locaux de bananier à dessert tandis que le *Fundación Hondureña de Investigación Agrícola* (FHIA) au Honduras, le Centre africain de recherches sur bananiers et plantains (CARBAP) au Cameroun et l'*International Institute of Tropical Agriculture* (IITA) au Nigeria travaillent sur l'amélioration du bananier à banane à cuire. Enfin, le CIRAD en Guadeloupe, a fortement investi depuis une vingtaine d'années, sur l'amélioration génétique

Production de variétés tétraploïdes ou triploïdes

Création de variétés tétraploïdes. Certaines variétés triploïdes (AAA ou AAB) produisent de rares gamètes maternels non réduits ($n = 3x = 33$) qui, après fécondation avec du pollen d'un géniteur diploïde de *M. acuminata* (AA), sont à l'origine d'hybrides tétraploïdes capables de germer *in vitro* dans de fortes proportions. Cette stratégie conçue sur une base d'additivité consiste à associer l'intégralité du génome de la variété cultivée à un génome paternel haploïde porteur de résistances pour synthétiser des hybrides proches des variétés maternelles, mais qui soient résistants aux maladies. Cette stratégie d'amélioration a été employée dès le début du ^{xx}e siècle pour sélectionner des variétés tétraploïdes du sous-groupe Gros Michel ayant incorporé une résistance à la maladie de Panama. Tous les efforts ont porté sur la sélection des parents mâles (des espèces sauvages ou des clones améliorés associant résistance aux maladies et bonnes performances agronomiques). De nombreux hybrides tétraploïdes de type « dessert » (AAAA) ou de type « à cuire » (AAAB) ont été obtenus par croisements ('GoldFinger', 'FHIA20' et 'FHIA21', 'PITA9', 'CRBP39'). Cependant, très peu de ces hybrides produisent un fruit atteignant la qualité culinaire de celui des variétés traditionnelles utilisées comme parents femelles. De plus, ces hybrides présentent des défauts communs à l'ensemble des variétés tétraploïdes de bananier. Ils ont un port retombant qui rend les plantes plus vulnérables aux effets du vent (cassure des pétioles). Ils sont plus fertiles que les variétés triploïdes, ce qui se traduit par l'apparition épisodique de graines très dures rendant le fruit impropre à la consommation. Les bananes produites présentent surtout de mauvaises performances de conservation après récolte, ce qui restreint leur utilisation pour l'approvisionnement des marchés locaux. Enfin, les essais de rétrocroisements de ces tétraploïdes avec d'autres diploïdes améliorés n'ont jamais débouché sur la production d'hybrides triploïdes intéressants (en raison des réarrangements chromosomiques lors de la méiose du tétraploïde).

Création de variétés triploïdes. Le CIRAD a développé, pour sa part, de nouvelles options reposant sur la création d'hybrides triploïdes à partir de plantes diploïdes. Ce choix part du constat que l'approche tétraploïde génère de fortes contraintes tant au plan stratégique qu'en terme de produit fini (notamment la faiblesse des performances post-récolte du fruit). Il s'appuie aussi sur le fait que toutes les variétés naturelles ayant un fort impact économique au niveau mondial étaient triploïdes et que ce constat n'est peut-être pas le résultat du seul hasard. Cette stratégie est basée sur une recherche d'aptitude à la combinaison entre géniteurs diploïdes dont l'un des deux sera un parent donneur de diplogamètes. Elle vise à associer par complémentarité les caractères favorables apportés par les deux parents et à favoriser une maximalisation de l'hétérozygotie dans les descendances triploïdes que celles-ci soient de constitution mono- ou interspécifique. Elle repose aussi sur une bonne connaissance des relations phylogéniques au sein du complexe d'espèces diploïdes / triploïdes afin de mieux piloter le choix des géniteurs à croiser. Les résultats ont montré que la variabilité inter-familles est fortement dépendante des couples de parents choisis et, dans tous les cas, bien supérieure à la variabilité intra-famille. C'est ainsi que les caractères « à cuire » ou « dessert », la productivité et la résistance à certaines maladies dépendent du génome de *M. acuminata*. Le génome de *M. balbisiana* contrôle aussi des caractères agronomiques intéressants tels que la vigueur végétative et de nombreuses résistances. Malheureusement, *M. balbisiana* transmet les séquences du virus de la mosaïque en tirets du bananier (badnavirus) insérées dans son génome qui sont susceptibles de s'activer dans un contexte génomique de *M. acuminata*, sous l'effet d'un croisement ou d'un stress, pour produire des particules virales pathogènes. Le CIRAD oriente ses travaux sur la recherche de clones de *M. balbisiana* exempts de séquences intégrées et teste tous les types de nouvelles variétés obtenues à partir des seuls génomes A. Cette stratégie a permis d'obtenir, dès 1996, des variétés triploïdes de *M. acuminata* présentant des caractéristiques agronomiques extrêmement variées (bonne vigueur, régime plus gros que celui des parents diploïdes, niveau de stérilité satisfaisant,...), des résistances aux maladies (cercosporioses jaune et noire) et des fruits aux formes, couleurs et saveurs variées.

du bananier d'exportation et sur les variétés des pays en développement pour l'approvisionnement des marchés locaux.

Caractères importants améliorés

Réduction des traitements phytosanitaires. La culture des bananiers pour l'exportation est intensive et repose sur l'utilisation de très nombreux traitements phytosanitaires. Les producteurs réalisent jusqu'à un traitement fongicide aérien par semaine (au Costa Rica et au Honduras), ce qui fait de cette culture une des premières en ce qui concerne l'application de produits chimiques. En production vivrière ou pour les marchés locaux, les traitements phytosanitaires sont souvent inaccessibles à la majorité des agriculteurs. La mise en place de matériel sain provenant de culture *in vitro*, la création de variétés de taille réduite et résistantes aux bio-agresseurs, ainsi que le développement de bonnes pratiques culturales, permettent de réduire les traitements phytosanitaires de manière importante. Cette diminution des traitements se traduit par des économies substantielles dans les coûts de production et représente une avancée importante dans la préservation de l'environnement.

Résistance génétique aux bio-agresseurs

Maladie de Panama (*Fusarium oxysporum f. sp. cubense*). Cette maladie, identifiée pour la première fois en 1874 en Australie, se manifeste aujourd'hui dans presque toutes les zones tropicales et subtropicales de production de bananes. Elle est causée par un champignon du sol qui s'attaque aux racines et bouche les vaisseaux de xylème, ce qui se traduit par un flétrissement de la plante. Cette maladie a dévasté la culture de la variété 'Gros Michel' dans la première moitié du XX^e siècle. Cette variété a été remplacée par des variétés du sous-groupe Cavendish qui se sont avérées résistantes aux races qui existaient alors. La race 4 de cette maladie, identifiée dès 1931 aux Canaries, affecte les variétés du sous-groupe Cavendish en zone subtropicale sous certaines conditions défavorables de croissance. En 1995, est apparue en Indonésie et Malaisie une nouvelle race 4 qui affecte les Cavendish en conditions tropicales. Une forte expansion de cette maladie du sol est aujourd'hui très improbable en raison de l'utilisation de vitro-plants sains pour les échanges internationaux et comme matériel de plantation. De rares variétés hybrides résistantes à cette nouvelle race 4 de la maladie de Panama ont été sélectionnées.

Cercosporioses. Deux types principaux de cercosporiose menacent la production bananière : la noire et la jaune. La cercosporiose noire (aussi appelée maladie des raies noires), qui est due à un champignon parasite des feuilles, *Mycosphaerella fijiensis*, est présente dans tous les pays producteurs d'Amérique latine, d'Asie, d'Afrique et des Grandes Antilles. Bien qu'on ne puisse écarter les risques d'une dissémination naturelle des spores par le vent, la transmission d'une région à l'autre de la maladie résulte plus vraisemblablement d'un transfert incontrôlé de matériel végétal infecté. Le champignon détruit le feuillage des plantes par

coalescence de plages nécrotiques, occasionnant des baisses de rendement de l'ordre de 50 %. La cercosporiose jaune (appelée aussi maladie de Sigatoka) qui agit de façon identique à la précédente bien que moins agressive, est due à *Mycosphaerella musicola*. Elle est encore présente au sud du Brésil et aux Petites Antilles (Guadeloupe, Martinique) où elle est contrôlée dans le cadre d'une lutte chimique raisonnée par traitement aérien. Un certain nombre de variétés naturelles notamment de type à cuire (Plantain) sont résistantes à cette maladie alors qu'elles sont sensibles à la cercosporiose noire. Des sources de résistances à ces deux maladies ont été trouvées dans des espèces sauvages et quelques clones cultivés ; elles ont été introduites dans de nombreuses nouvelles variétés hybrides (tétraploïdes ou triploïdes) par croisements. Une nouvelle espèce, *Mycosphaerella eumusa* semble s'étendre maintenant en Asie et dans l'océan Indien.

Nématodes (surtout *Radopholus similis*). Les nématodes sont des endoparasites migrateurs dans les racines et les souches de bananier. Ils occasionnent la formation de nécroses racinaires qui peuvent être accentuées par d'autres agents pathogènes (champignons et bactéries). La destruction des tissus souterrains entraîne, non seulement une réduction de la nutrition hydrique et minérale et une baisse du rendement, mais aussi un mauvais ancrage des plantes dans le sol qui chutent dès les premiers coups de vent. Les méthodes de lutte sont encore dominées par l'application de nématicides (organophosphorés et carbamates), efficaces mais nuisibles pour l'environnement. De nouvelles méthodes, basées sur la plantation de vitro-plants sur des sols assainis à la suite d'une rotation culturale ou d'une période de jachère sont maintenant utilisées pour réduire l'impact de ces parasites. Comme pour les cercosporioses, des gènes de résistance ont été trouvés dans des espèces sauvages et des variétés cultivées. Ils ont été transférés de façon efficace dans quelques variétés hybrides.

Productivité. La productivité des variétés produisant des bananes pour le marché local est comprise entre trois et quelques dizaines de tonnes à l'hectare en raison, notamment, de leur forte sensibilité aux maladies et de l'absence de protection intégrée alors que le potentiel de rendement est beaucoup plus élevé. L'utilisation de variétés résistantes aux maladies en conditions non intensives a déjà permis une amélioration très sensible du rendement (Afrique, Cuba...). Le rendement des bananeraies pour l'exportation est plus élevé : de 15 à 65 t/ha. Il devrait être équivalent avec de nouvelles variétés, mais en utilisant une charge pesticide beaucoup plus réduite que ce qui est pratiqué actuellement, surtout en association avec l'usage des vitro-plants.

Réduction de la taille. Il n'y a pas de plantes de petite taille dans le matériel génétique sauvage du bananier. Des bananiers de petite taille ont pourtant été sélectionnés par l'homme à partir de mutations spontanées sur des formes ancestrales multipliées par voie végétative. Cette étape a été capitale pour l'intensification de la culture du bananier, la réduction de la taille ayant permis de faire des cultures de haute densité et de réduire la sensibilité des bananiers au

vent. De plus, les traitements avec des fongicides par application au sol pour prévenir les maladies foliaires sont facilités sur ce genre de variétés. Ces mutations (spontanées ou induites) de taille sont communes chez le bananier et touchent tous les groupes de bananiers triploïdes.

Adaptation à l'emballage, au transport et à la commercialisation. Des variétés produisant des fruits tous de la même longueur ont été sélectionnées afin de faciliter l'emballage et le transport. Pour l'exportation, le fruit doit avoir une physiologie et un comportement post-récolte compatibles avec les contraintes actuelles de commercialisation, c'est-à-dire : pouvoir rester vert pendant 20 à 25 jours, supporter sans dommage une descente en froid à 13 °C durant le transport maritime, présenter une évolution des qualités organoleptiques en bonne concordance avec l'évolution de sa couleur en sortie de mûrissier et avoir une durée de vie, en fruit jaune, la plus longue possible.

Cas particulier des productions vivrières. En raison du poids des traditions dans les modes de préparation culinaire, la qualité du fruit des nouvelles variétés hybrides destinées aux marchés vivriers doit être très proche de celle du fruit des variétés déjà existantes actuellement. Ces hybrides aussi doivent être résistants aux maladies car les petits agriculteurs n'ont pas accès aux produits phytosanitaires. Ces variétés doivent, en outre, posséder un système racinaire puissant afin de permettre une exploitation profonde des ressources du sol et de résister à l'arrachement. Les variétés de petite taille sont aussi préférées pour résister au vent.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation des mutations spontanées **OUI**

C'est la base de la diversification phénotypique des bananiers par multiplication végétative au sein des sous-groupes actuels.

Mutagenèse induite

OUI, principalement sur le sous-groupe Cavendish.

• **Des mutations ont été induites par traitement physique ou chimique pour les caractères suivants :**

- la précocité ('Novaria', 1993),
- la taille de la plante ('Klue Hom Thong Ku 1', 1985),
- la précocité et la taille du régime plus gros avec une forme plus cylindrique ('GN-60A').

• **Sélection de variants somaclonaux après passage par la culture *in vitro* :**

- pour la résistance à la race 4 de la maladie de Panama, notamment à Taiwan ('Tai-Chiao n° 1'),
- pour une taille plus grande de la plante avec de meilleures qualités agronomiques tout en conservant la résistance aux bio-agresseurs ('Giant Parfitt' en Australie).

EN COURS

La recherche de mutants dans les variétés 'IRFA916 à 921' afin de réduire leur taille.

suite...

... suite

Croisements
interspécifiques

OUI

Beaucoup de variétés cultivées sont des hybrides interspécifiques entre *M. balbisiana* (apportant vigueur végétative et résistances aux maladies) et *M. acuminata* (apportant productivité, qualité du fruit et résistances aux maladies) (variétés triploïdes AAB : 'IRFA909', 'IRFA910' et 'IRFA914' et variétés tétraploïdes AAAB : 'Goldfinger', 'FHIA20', 'FHIA21', 'CRBP39', 'PITA9', ...).

Quelques variétés cultivées contiennent une partie du génome S de *M. schizocarpa* N. W. Simmonds ou le génome T de *M. textilis* Née ('Yawa 2' – ABBT).

Hybridation somatique

ESSAIS

Pour accroître la variabilité des plantes tétraploïdes par fusion diploïde/diploïde, des fusions de protoplastes ont été réalisées et leurs produits sont en cours de caractérisation. Cette méthode devrait permettre, en conjonction avec le développement de l'haplométhode, de créer directement des variétés triploïdes par la fusion de cellules diploïdes avec des cellules haploïdes.

Élévation du niveau
de ploïdie

OUI

Le doublement du stock chromosomique des clones diploïdes est pratiqué sur des touffes proliférantes de bourgeons végétatifs cultivées *in vitro* en milieu liquide agité. Après le traitement à la colchicine, les explants sont replacés en prolifération en milieu liquide, puis les plantes régénérées sont isolées et repiquées individuellement sur milieu solide. Les plantes diploïdes-doublées sont repérées par cytométrie en flux.

Les espèces sauvages sont diploïdes.

La majorité des variétés cultivées sont triploïdes.

Il existe quelques variétés tétraploïdes hybrides ('Goldfinger', 'FHIA20', 'FHIA21', 'CRBP39', 'PITA9').

Transgénèse

EN COURS

La transformation génétique est possible par canon à ADN ou par *Agrobacterium tumefaciens*. Plusieurs programmes de transgénèse, à des stades d'avancement très variables, sont en cours. Ils ont plusieurs objectifs.

Résistances aux bio-agresseurs. Les gènes de résistances aux différents bio-agresseurs n'ont pas encore été clonés, aussi faut-il avoir recours à des gènes provenant d'autres espèces. Des transferts de résistances au virus de la mosaïque du concombre ou au virus des feuilles en bouquet du bananier (*Banana bunchy top virus*, BBTV) seraient intéressants car il n'existe pas de bananier naturellement résistant. La création de bananiers produisant la toxine de *Bacillus thuringiensis* est motivée par les dégâts causés par les charançons. Des gènes codant une chitinase ou des peptides antifongiques ont été introduits dans un bananier pour induire une résistance aux cercosporioses.

Amélioration de la conservation du fruit. Des bananiers transgéniques exprimant un gène anti-sens de l'ACC (1 – aminocyclopropane – 1 – carboxylate synthase) ont été générés afin de bloquer la production de l'éthylène et de ralentir la vitesse de maturation de la banane.

Réalisation de banane vaccin. La création de variétés donnant des bananes produisant un antigène de l'hépatite B et pouvant servir de vaccin oral est en cours au *Boyce Thompson Institute for Plant Research* (BTI) aux États-Unis.

suite...

... suite

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI En un an, à partir d'un rejet, il est possible d'obtenir 10 plantes par les méthodes horticoles alors que l'on en obtient 1 000 par bourgeonnement <i>in vitro</i>. 50 millions de vitro-plants sont produits par an (estimation en 2001). En l'absence d'attaque de nématodes, les vitro-plants se développent plus rapidement, sont plus homogènes et plus productifs que les plantes issues de multiplication horticole traditionnelle (rejets), ceci pendant au moins trois récoltes successives.
	ESSAIS Des protocoles de multiplication par embryogenèse somatique, plus rapides et plus économiques, sont en cours de validation. La production de semences artificielles, à partir d'embryons somatiques, a été tentée.
Sélection sanitaire	OUI La culture <i>in vitro</i> est utilisée pour produire des plantes indemnes de champignons, bactéries et nématodes. Associée à la cryothérapie par congélation momentanée de tissus méristématiques, elle permet d'éliminer les principaux virus du bananier (virus des feuilles en bouquet du bananier, virus de la mosaïque du concombre, virus de la mosaïque en tirets du bananier).
Culture d'embryons zygotiques	OUI La germination des graines de bananier est très irrégulière. Le sauvetage des embryons zygotiques <i>in vitro</i> permet de faire passer le taux de germination des graines hybrides inter- ou intraspécifiques qui varie de 0 à 25 % à près de 95 %. Cet outil est indispensable pour la création variétale chez le bananier.
Haploïdisation	EN COURS La culture d'anthers <i>in vitro</i> (androgenèse) a été appliquée avec succès sur <i>M. acuminata</i> (AA) et <i>M. balbisiana</i> (BB), cette dernière espèce donnant les meilleurs résultats. L'haploïdisation de <i>M. balbisiana</i> est envisagée pour sélectionner des clones indemnes de séquences intégrées du virus de la mosaïque en tirets du bananier (badnavirus) et pour la fusion somatique haplodiploïde de protoplastes (AA + B → AAB). Les plantes haploïdes doublées de <i>M. balbisiana</i> n'ont pas encore été utilisées pour produire des variétés.
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires sont utilisés : – pour la gestion des ressources génétiques (RFLP, RAPD et microsatellites) et le pilotage des croisements, – pour la réalisation de cartes génétiques et la recherche de QTL, – pour la recherche de gènes d'intérêt (métabolisme éthylénique, métabolisme des sucres, expression des variations somaclonales, etc.), – pour l'identification du matériel (microsatellites).

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection de mutants (spontanés ou induits). Création et sélection de variétés tétraploïdes (cf. aussi encadré p. 104). Sélection des clones diploïdes les plus intéressants (surtout AA). Croisement d'une variété triploïde commerciale (surtout AAA et AAB) avec les diploïdes sélectionnés et recherche des descendants tétraploïdes obtenus grâce à une non réduction des gamètes du parent triploïde $AAA \times AA \Rightarrow AAAA$ et $AAB \times AA \Rightarrow AABA$. Création et sélection de variétés triploïdes (cf. aussi encadré p. 104). Sélection des clones diploïdes les plus intéressants AA et AB. Réalisation de doublements du stock chromosomique à la colchicine $AA \Rightarrow AAAA$ et $AB \Rightarrow AABB$. Croisement des diploïdes par les tétraploïdes surtout : $AA \times AAAA \Rightarrow AAA$, et $BB \times AAAA \Rightarrow BAA$ et $AABB \times AA \Rightarrow ABA$.
Types variétaux	Variété clonale ESSAIS Variété hybride F₁. Les premiers hybrides F₁ triploïdes à vocation d'exportation sont en phase de validation avec des producteurs antillais.

Perspectives d'amélioration

Les besoins du secteur de l'exportation seront probablement l'élément moteur de la sélection du bananier. La base génétique des variétés cultivées dans le monde est extrêmement étroite. Le risque de disparition de cette culture à cause d'une maladie émergente est important. Il est, par conséquent, nécessaire d'élargir les bases génétiques pour rendre cette production moins fragile vis-à-vis des parasites. La sélection et le développement de nouvelles variétés devraient permettre d'appuyer cette stratégie. Celles dont la production est destinée à l'exportation devront être résistantes à la maladie de Panama, aux cercosporioses et aux nématodes. En associant de nouvelles pratiques culturales et des variétés résistantes, il devrait être possible de diminuer fortement le nombre de traitements phytosanitaires, ce qui aurait pour effet de préserver l'environnement et de réduire les coûts de production. La tendance pour l'avenir est d'essayer de pérenniser une culture du bananier en équilibre avec l'environnement.

Caractères à améliorer

Résistance aux bio-agresseurs

Maladie de Panama. Une nouvelle race de cette maladie fongique est apparue récemment. Les variétés du sous-groupe Cavendish, qui sont résistantes aux autres races, et d'autres variétés sont actuellement ravagées en Australie, en Afrique du Sud et dans certaines parties de l'Asie. Cette maladie représente un grave danger pour les bananiers d'exportation. Il est donc urgent de mieux diffuser les variétés résistantes et d'en créer de nouvelles.

Cercosporioses. En Amérique centrale, la lutte chimique contre cette maladie devient de moins en moins efficace et nécessite l'usage d'une quantité croissante de fongicides. De plus, des variétés naturelles et certains hybrides ont vu déjà, dans certaines situations, leurs résistances contournées par les populations pathogènes des champignons, notamment dans la zone pacifique. Il importe donc d'anticiper ces contournements de résistance (aux fongicides et génétique) en diversifiant et combinant les sources de résistance.

Diversification permettant une segmentation sur les marchés d'exportation. Il n'existe, sur les marchés d'exportation, qu'un seul type de banane que ce soit en Amérique du Nord, en Europe ou au Japon. Des efforts ont été faits, ces dernières années, pour revaloriser le marché de la banane par une différenciation des modes de production ou de conditionnement. Cependant, à l'image de l'évolution des autres filières « fruits & légumes », la filière « banane » doit pouvoir être revalorisée par une politique de segmentation s'appuyant sur de nouvelles variétés. Ces nouvelles variétés, résistantes à certaines maladies, pourront être produites avec moins de pesticides que les variétés traditionnelles. Elles pourront bénéficier d'une plus forte valeur ajoutée sur les marchés comme nouveau produit obtenu dans de meilleures conditions, sous réserve que ces nouvelles bananes plaisent aux consommateurs de ces pays.

Techniques à développer

Marquage moléculaire. Quelle que soit la stratégie adoptée, c'est-à-dire la création de variétés tétraploïdes ou la création de variétés triploïdes, il est intéressant de poursuivre l'amélioration des variétés diploïdes de manière à ce que celles-ci cumulent de nombreuses résistances aux maladies et des gènes favorables contrôlant, par exemple, la forme du régime ou la qualité du fruit. La sélection assistée par marqueurs devrait être d'une aide précieuse, d'une part pour améliorer les bananiers diploïdes *M. acuminata*, et d'autre part pour rechercher ou sélectionner de nouveaux clones de *M. balbisiana* exempts de séquences intégrées de badnavirus.

Gestion des croisements. Il serait nécessaire de développer une meilleure exploitation des aptitudes à la combinaison des clones notamment au niveau triploïde en explorant de nouvelles combinaisons de croisements et toutes les possibilités de dosages alléliques en combinaisons réciproques.

Transgénèse. La transgénèse pourrait être utilisée notamment pour introduire des résistances aux maladies, en particulier celles causées par les virus pour lesquelles aucune source de résistance n'a été identifiée dans la nature. De plus, l'application de cette technique ne pose aucun problème de diffusion de transgènes dans l'environnement, que ce soit *via* le pollen ou *via* les graines, le bananier étant complètement stérile.

Protection des variétés

Les pays producteurs ne possèdent pas de catalogue officiel avec la notion d'autorisation de mise sur le marché. Par contre, les centres de recherche des pays producteurs publient des listes de clones recommandés pour la culture. Bien souvent, ces centres de recherche s'occupent de la multiplication et de la diffusion des variétés. Depuis la conférence de Rio, un certain nombre de pays cherchent à protéger ce qu'ils considèrent comme leurs variétés. Les deux voies possibles sont le COV et le brevet :

– **le COV.** Parmi les pays cultivant le bananier, seul un petit nombre fait partie de l'UPOV. Au niveau français, le CIRAD a déjà déposé huit demandes de COV pour des nouvelles variétés de bananier de constitution interspécifique (AAB – 3 variétés : 'IRFA909', 'IRFA910' et 'IRFA914') ou monospécifique (AAA – 'FLHORBAN916 à 921') avec une demande d'extension européenne pour 6 d'entre elles. C'est le GEVES qui mandate le CIRAD pour le compte de l'OCVV pour conduire les examens DHS, sur sa station de Guadeloupe, sur la base d'une liste de descripteurs morphologiques ;

– **le brevet.** Plusieurs variétés de bananier ont été protégées par brevet aux États-Unis, dont le bananier Plantain 'FHIA21' et le bananier à dessert 'Goldfinger'.

Pour en savoir plus

Assani A., Bakry F., Kerbellec F., Haicour R., Wenzel G. et Foroughi-Wehr B., 2003. Production of haploids from anther culture of banana [*Musa balbisiana* (BB)]. *Plant Cell Rep.*, 21, 511-516.

Assani A., Haicour R., Wenzel G., Cote F., Bakry F., Foroughi-Wehr B., Ducreux G., Aguillar M.E. et Grapin A., 2001. Plant regeneration from protoplasts of dessert banana cv. 'Grande Naine' (*Musa* spp., Cavendish sub-group AAA) via somatic embryogenesis. *Plant Cell Rep.*, 20 (6), 482-488.

Bakry F., Carreel F., Caruana M.L., Côte F.X., Jenny C. et Tézenas du Montcel H., 1997. Les bananiers. Dans : *L'amélioration des plantes tropicales*. A. Charrier, M. Jacquot, S. Hamon et D. Nicolas, éd., Collection Repères. CIRAD-ORSTOM, Montpellier, 109-139.

Bakry F. et Horry J.P., 1992. Evidence for androgenesis in bananas. Dans : *Biologie de la reproduction et amélioration des plantes : livre des résumés de posters*. EUCARPIA, Angers, France, 133-134.

Bakry F., 2001. La diversité génétique des bananiers et les perspectives de création de nouvelles variétés : pourquoi, comment. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 87 (6), 129-141.

Bakry F., 2005. La diversité génétique des bananiers cultivés : situation actuelle et perspectives. *Sél. Fr.*, 55, 33-41.

Becker D.K., Dugdale B., Smith M.K., Harding R.M. et Dale J.L., 2000. Genetic transformation of Cavendish banana (*Musa* spp. AAA group) cv. 'Grande Naine' via microprojectile bombardment. *Plant Cell Rep.*, 19 (3), 229-234.

Bois D., 1927. Bananier. Dans : *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture. II. Phanérogames fruitières*. Éd. Paul Lechevalier, Paris, 550-560.

Carreel F., Gonzalez de Leon D., Lagoda P., Lanaud C., Jenny C., Horry J.P. et Tézenas du Montcel H., 2002. Ascertaining maternal and paternal lineage within *Musa* by chloroplast and mitochondrial DNA RFLP analyses. *Genome*, 45, 679-692.

- Cronauer S.S. et Krikorian A.D.**, 1986. Banana. Dans : *Biotechnology in agriculture and forestry* : Trees, Y.P.S. Bajaj (éd.), Springer-Verlag, Berlin, 162-171.
- Crouch J.H., Crouch H.K., Constandt H., van Gysel A., Breyne P., van Montague M., Jarret R.L. et Ortiz R.**, 1999. Comparison of PCR-based molecular marker analyses of *Musa* breeding populations. *Mol. Breed.*, 5 (3), 233-244.
- Fauré S., Noyer J.L., Carreel F., Horry J.P., Bakry F. et Lanaud C.**, 1994. Maternal inheritance of chloroplast genome and paternal inheritance of mitochondrial genome in bananas (*Musa acuminata*). *Curr. Genet.*, 25 (3), 265-269.
- Ganapathi T.R., Suprasanna P., Bapat V.A. et Rao P.S.**, 1992. Propagation of banana through encapsulated shoot tips. *Plant Cell Rep.*, 11 (11), 571-575.
- Grapin A., Schwendiman J. et Teisson C.**, 1996. Somatic embryogenesis in plantain banana. *In vitro Cell. Dev. Biol.-Plant*, 32 (2), 66-71.
- Grapin A., Noyer J.L., Carreel F., Dambier D., Baurens F.C., Lanaud C. et Lagoda P.J.L.**, 1998. Diploid *Musa acuminata* genetic diversity with sequenced Tagged Microsatellite Sites (STMS). *Electrophoresis*, 19, 1374-1380.
- Harper G., Osuji J.O., Heslop-Harrison J.S. et Hull R.**, 1999. Integration of banana streak badnavirus infection into the *Musa* genome : molecular and cytogenetic evidence. *Virology*, 255, 207-213.
- Hwang S.C. et Ko W.H.**, 1990. Selection of improved cavendish banana mutants resistant to race 4 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Acta Hortic.*, 275, 417-423.
- Kosky R.G., Silva M. de F., Perez L.P., Gilliard T., Martinez F.B., Vega M.R., Milian M.C. et Mendoza E.Q.**, 2002. Somatic embryogenesis of the banana hybrid cultivar FHIA-18 (AAAB) in liquid medium and scaled-up in a bioreactor. *Plant Cell, Tissue Organ Cult.*, 68 (1), 21-26.
- Molina C., Kaemmer D., Aponte S., Weising K. et Kahl G.**, 2001. Microsatellite markers for the fungal banana pathogen *Mycosphaerella musicola*. *Mol. Ecol. Notes*, 1 (3), 137-139.
- Okole B.N. et Schulz F.A.**, 1997. Selection of *Mycosphaerella fijiensis*-resistant cell lines from micro-cross sections of banana and plantain. *Plant Cell Rep.*, 16 (5), 339-343.
- Remy S., Buyens A., Cammue B.P.A., Swennen R. et Sagi L.**, 1998. Production of transgenic banana plants expressing antifungal proteins. *Acta Hortic.*, 490, 433-436.
- Sagi L., Remy S. et Swennen R.**, 1998. Fungal disease control in banana, a tropical monocot: transgenic plants in the third world? *Phytoprotection*, 79, 117-120.
- Smith M.K., Searle C., Langdon P.W., Schaffer B. et Whaley A.W.**, 2001. Comparison between micropropagated banana (*Musa* AAA ; 'Williams') and conventional planting material during the first 12 months of development. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 76 (1), 83-87.
- Tenkouano A., Crouch J.H., Crouch H.K., Vuylsteke D. et Ortiz R.**, 1999. Comparison of DNA marker and pedigree-based methods of genetic analysis of plantain and banana (*Musa* spp.) clones. *Theor. Appl. Genet.*, 98 (1), 62-68.
- Vuylsteke D., Ortiz R., Ferris R.S.B. et Crouch J.H.**, 1997. Plantain improvement. *Plant Breed. Rev.*, 14, 267-320.
- Vuylsteke D., Swennen R. et De Langhe E.**, 1991. Development and performance of black sigatoka-resistant tetraploid hybrids of plantain (*Musa* spp. AAB group). *Euphytica*, 65, 33-42.

La betterave sucrière et la betterave fourragère

Beta vulgaris L. subsp. *vulgaris* ($2n = 2x = 18$)
(Chénopodiacées)

Présentation de l'espèce

C'est en Mésopotamie que se situe l'aire d'origine de la betterave *Beta vulgaris* L., et qu'ont eu lieu vraisemblablement les premières cueillettes lorsque des groupes humains ont commencé à se sédentariser. Puis, elle a dû cheminer à travers le Caucase à la faveur des voyages des éleveurs nomades, en particulier les Khazars. À la fin du XIII^e siècle, leur royaume a été détruit par les Slaves et ils connurent un exode qui les conduisit en Europe centrale. Ils sont probablement à l'origine du transport de la betterave jusqu'en Pologne.

L'utilisation de racines charnues, probablement de betterave, comme plante médicinale, a pour la première fois été mentionnée par des Grecs tels qu'Hippocrate, Théocrate, Dioscoride et Galien. Ensuite, la betterave *Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* a surtout été cultivée pour la consommation de ses feuilles.

La betterave fourragère s'est répandue dans toute l'Europe à partir du XVI^e siècle. Elle y a été sélectionnée depuis cette époque pour un type morphologique particulier : une racine lourde avec une partie hors terre importante, pauvre en sucre et avec un sillon saccharifère réduit. C'est Olivier de Serres en 1575, qui a, le premier, signalé la présence de sucre dans la betterave. À la fin du XVIII^e siècle, la betterave était aussi couramment utilisée comme plante fourragère.

L'utilisation sucrière de la racine de betterave est originaire d'Allemagne, vraisemblablement à partir d'une betterave très pauvre (7 % de sucre) et comparable à celle cultivée encore actuellement en Turquie pour la consommation humaine (racines et feuilles) sous les noms de populations 'Sivas' et 'Qorum' : la racine est plus petite et enterrée et présente un long sillon saccharifère.

En 1775, Philippe-Victoire de Vilmorin a introduit la betterave sucrière de Prusse ou de Silésie. Des techniques pour extraire le sucre furent mises au point

par le chimiste allemand A.S. Marggraf. En 1786, F.C. Achard organisa un champ d'expériences près de Berlin (Allemagne) et en 1802, la première fabrique de sucre fonctionna à Cunern, en Silésie (Pologne). Ce dernier construisit ensuite d'autres sucreries et fit une sélection qui déboucha sur la création de 'Blanche de Silésie', première véritable variété de betterave sucrière.

Jusqu'au début du XIX^e siècle, la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) demeura la principale source de sucre. La guerre, entre la France et les Anglais, déclarée en 1792, ainsi que le blocus continental imposé par Napoléon en 1806, conduisirent à une raréfaction du sucre de canne. Sous l'influence de Benjamin Delessert, qui avait trouvé en 1812 le moyen de produire du sucre cristallisé en très grande quantité à partir de la racine, Napoléon décida de promouvoir la culture massive de betterave à sucre.

En 1856, Louis de Vilmorin décrit à l'Académie des Sciences, le test de descendance (sélection généalogique) qu'il avait imaginé et appliqué avec succès à l'amélioration de la betterave (rappelons que la publication des lois de Mendel date de 1865). D'une part, l'utilisation de méthodes de dosage pour déterminer rapidement la richesse individuelle en sucre dans la racine (mesure densimétrique dite « procédé du lingot » dans les années 1840-1850 ; saccharimètre à partir de 1853 et polarisation de contrôle à partir de 1856) et d'autre part, l'emploi, pour la première fois, de la méthode de sélection individuelle, ont contribué significativement à la création de variétés enrichies en sucre. Grâce à ces améliorations, les trois cinquièmes du sucre consommé dans le monde en 1890 provenaient de la betterave.

À partir de cette date, la culture de la betterave sucrière a connu dans le monde des hauts et des bas. Ainsi, l'apparition, en 1902, de la frisolée américaine de la betterave (*curly top*), maladie à virus transmise par une cicadelle, a menacé très sérieusement sa culture aux États-Unis. Celle-ci n'a dû son salut qu'aux travaux menés dans ce pays, qui ont conduit à la création de géniteurs résistants permettant de juguler la maladie. Par ailleurs, la destruction de nombreuses sucreries en France, pendant la première guerre mondiale, a été la cause d'une chute importante de la production.

La betterave est une espèce bisannuelle et allogame à pollinisation principalement anémophile. Elle est multipliée par semences. Les fleurs sont disposées en grappes et sont, soit isolées, soit réunies en petits glomérules. Chaque fruit contient une seule graine. Les ovaires des fleurs sont réunis dans le réceptacle commun du glomérule. On obtient donc une semence multigerme, si deux ou trois fleurs sont réunies en un glomérule et une semence monogerme, si la fleur est isolée.

La betterave produit un pollen abondant qui peut être transporté sur de grandes distances par le vent. La betterave cultivée peut se croiser potentiellement avec la betterave sauvage, mauvaise herbe présente dans les zones de production de semences, avec la poirée (ou blette ou bette à cardes) cultivée dans les jardins et avec la sous-espèce sauvage voisine *B. vulgaris* L. subsp. *maritima* (L.) Arcang.

La betterave sauvage, mauvaise herbe, descend vraisemblablement de la betterave cultivée pour ses feuilles à travers tout l'Empire romain. C'est une espèce férale (ancienne espèce domestiquée redevenue sauvage). On peut la trouver dans pratiquement toutes les terres argilo-calcaires du Bassin méditerranéen. Elle est cultivée encore à notre époque pour ses feuilles consommées cuites comme celles de l'épinard (*Spinacia oleracea* L.) en Tunisie et en Égypte notamment. Contrairement à *Beta vulgaris maritima* qui croît au bord de la mer et dans les estuaires à la limite des grandes marées, la betterave férale croît à l'intérieur des terres. Elle a gardé de son ancienne domestication deux caractères : un port beaucoup plus dressé que *Beta vulgaris maritima* et une chute beaucoup plus tardive des graines. *B. vulgaris maritima* et *B. vulgaris vulgaris* sont de plus en plus considérées comme faisant partie de la même espèce, mais on considère encore leur croisement comme interspécifique. Cependant, les risques effectifs de pollinisation croisée sont faibles étant donné que *B. vulgaris maritima* se trouve uniquement dans une zone très restreinte (littoral) et que les betteraves mauvaises herbes sont systématiquement détruites. De plus, les variétés cultivées sont souvent stériles et de toute manière, récoltées avant floraison. En effet, la floraison est considérée comme très négative et est très fortement contre-sélectionnée.

La betterave est cultivée dans plus de 50 pays. La plupart des organisations de sélection de la betterave à sucre participent au réseau de ressources génétiques de *Beta* (*Beta Genetic Resources Network*) organisé avec l'assistance du Conseil international pour les ressources génétiques des plantes (IPGRI). Il existe une collection importante de betterave en Allemagne. La fusion d'un certain nombre d'établissements semenciers est probablement à l'origine de la disparition de collections.

Production et utilisation

Le produit récolté est la racine tubérisée. Il existe trois types de betterave selon leur utilisation : sucrière, fourragère ou potagère. Dans cette fiche, il ne sera question, que des deux premières.

Betterave sucrière

La racine est de forme tronconique et présente une zone longitudinale très marquée, délimitant une zone particulièrement riche en sucre (le sillon saccharifère).

La production mondiale a été de 250 millions de tonnes. en 2004. La France (30 millions de tonnes), l'Allemagne (27 millions de tonnes), les États-Unis (27 millions de tonnes) et la Russie (22 millions de tonnes) sont les principaux producteurs (données FAO, 2004).

Production de sucre. La France est le premier producteur mondial de sucre de betterave et le quatrième exportateur mondial de sucre, avec un excédent commercial d'environ 1 milliard d'euros. La production française en 2004 a été de 4,2 millions de tonnes de sucre blanc, soit 12,1 tonnes de sucre blanc à l'hectare. On peut ainsi mesurer la production du sucre consommable au mètre carré : celle-ci est passée de 70 g à l'époque de Napoléon à 1-1,3 kg actuellement. Aucune autre plante, sauf erreur, n'a connu un tel progrès depuis deux siècles.

Production d'alcool. Les sucreries actuelles sont souvent des sucreries-distilleries où la raffinerie du sucre est couplée avec une production d'alcool. La betterave fournit plus de la moitié de la production totale française d'alcool, utilisée en cosmétique ou en pharmacie et pour fabriquer des boissons et des spiritueux. De plus, en 2004 environ 720 000 tonnes de betterave ont été produites en France pour fabriquer de l'éthanol, carburant entrant directement ou sous forme de composés (éthyl-tertio-butyl-ester, ETBE) dans la composition de certains carburants. L'évolution de la fiscalité peut permettre d'envisager un développement important de ce débouché, car avec un rapport énergétique très favorable, l'éthanol de betterave peut contribuer à la lutte contre la pollution atmosphérique et l'effet de serre.

Coproduits. La production de sucre ou d'alcool entraîne la création de nombreux produits secondaires tels que les pulpes, des levures et du sucre mélasse. Les pulpes déshydratées ou surpressées sont utilisées pour la nutrition animale. Il est possible qu'elles trouvent un jour un débouché dans l'industrie papetière.

Betterave fourragère

La racine a une forme allongée ovoïde ou cylindrique, le sillon saccharifère est absent ou peu marqué. Elle est blanche ou colorée de rose, rouge ou jaune.

C'est un aliment appétible et très énergétique (1,15 UF/kg de matière sèche), surtout utilisé, après stockage, pour l'alimentation des bovins et ovins. Il peut être utilisé avec succès en alimentation animale, à condition de ne pas être consommé frais. En effet, les feuilles attachées au niveau du collet contiennent de l'acide oxalique.

Histoire des variétés cultivées en France

Betterave sucrière

1817, '**Blanche de Silésie**' ou '**Blanche de Prusse**' (Achard, Allemagne), variété issue d'une population de betterave fourragère. Cette betterave vigoureuse était à petite feuille, à racine conique avec un collet légèrement hors terre. C'est la première variété à l'origine de la betterave sucrière : elle a, en effet, servi de point de départ, aussi bien en Allemagne (avec F. C. Achard) qu'en France (avec Louis de Vilmorin) et jusqu'en 1880, pour la recherche d'individus très riches en sucre.

1850, 1861, 1890, 1906, 1920, '**Betterave à sucre améliorée Vilmorin**' (Vilmorin, France), série de variétés qui se sont succédées sous le même nom, mais qui représentaient des sélections successives, chacune apportant une amélioration pour le poids et la richesse en sucre de la racine par rapport à la précédente et la remplaçant.

1854, '**Betterave impériale**' (Knauer, Allemagne), variété population dont la teneur en sucre (11 à 13 %) était beaucoup plus élevée que celle de 'Blanche de Silésie' (7 à 9 %).

1899, '**Blanche française riche**' ou '**Fouquier d'Hérouel**' (M. Fouquier d'Hérouel à Vaux-sous-Laon et H. de Vilmorin à Verrières, France), variété à racine très longue, à feuillage vert foncé très lisse.

1929, '**US1**' (California Agricultural Experimental Station, États-Unis), première variété issue d'un programme de sélection des États-Unis. C'est aussi la première variété présentant une certaine résistance au virus de la frisolée américaine (*curly top*).

1960, '**Polybeta**' (Desprez, France), première variété polyploïde. C'est une variété population.

Début des années 1960, '**Trirave**' (Van der Have, Pays-Bas), première variété monogermine diffusée en Europe.

1966, '**Monohill**' (Hilleshög, Suède), première variété « monogermine génétique », performante. Dans ce cas, chaque fleur est isolée. Elle produit donc une seule semence. Le démariage des plantules, issues des semences jusqu'alors multigermes, n'est plus nécessaire.

1966, '**Monosvalöf**' (Hilleshög, Suède), une des premières variétés « monogermes génétiques » cultivées en France. Cette variété hybride et triploïde a connu un succès commercial exceptionnel.

1979, '**Monodoro**' (Hilleshög, Suède) et 1982, '**Ritmo**' (Maribo, Danemark), premières variétés tolérantes à la rhizomanie, porteuses d'une résistance multifactorielle de type Alba. Elles ont été cultivées en Italie.

1983, '**Allyx**' (SES, Belgique), variété hybride, anisoploïde et monogermine génétique, qui a connu un grand succès commercial.

1986, '**Rizor**' (SES-Italie, Italie), première variété tolérante à la rhizomanie cultivée en France. Cette variété hybride est diploïde et monogermine génétique. La tolérance est monofactorielle et appelée de type Rizor (*cf.* p. 124).

1988, '**Univers**' (Van der Have, Pays-Bas), première variété permettant la réduction de la tare terre. Elle est hybride, triploïde et monogermine génétique. Son succès a cependant été limité par sa mauvaise qualité industrielle et par la taille de son bouquet foliaire qui n'ont pas été appréciées par les industriels des sucreries et les cultivateurs, un petit bouquet foliaire entraînant une mauvaise défense contre les mauvaises herbes.

1992, '**Roxane**' (Florimond Desprez, France), première variété triploïde et résistante à la rhizomanie. Cette variété hybride et monogermine génétique a connu un grand succès commercial.

1992, '**Roberta**' (KWS Allemagne, Allemagne), variété hybride, diploïde et monogermine génétique ayant bénéficié d'un très grand succès commercial. Elle a aussi démontré qu'une variété diploïde, malgré le faible développement de la partie aérienne de plante, pouvait être plus performante qu'une variété triploïde, ce qui a complètement bouleversé les croyances de l'époque.

1993, '**Gabriela**' (KWS Allemagne, Allemagne), première variété hybride possédant une résistance à la rhizomanie basée sur le gène *Rz* (type Holly). Cette variété hybride est diploïde et monogermine génétique.

1996, '**Evasion**' et '**Nemakill**' (Hilleshög AB, Suède), premières variétés permettant de limiter la multiplication du nématode à kyste de la betterave. Cette résistance est le fait de la présence d'une partie d'un chromosome de *Beta procumbens* C. Sm. porteur du gène *HsIpro1*. L'origine interspécifique de cette résistance apporte quelques inconvénients (apparition de tumeurs et qualité industrielle médiocre due à une teneur élevée en impuretés) et celle-ci se transmet parfois avec une certaine instabilité. Ces variétés hybrides sont diploïdes et monogermes génétiques.

1997, '**Avantage**' (Desprez Veuve et Fils, France), variété hybride diploïde et monogermine génétique, résistante à la rhizomanie. Elle est issue d'haplométhode.

1998, '**Sherif**' (SES Europe, Belgique), variété hybride résistante à la rhizomanie connaissant un grand succès commercial. Cette variété hybride est diploïde et monogermine génétique.

1998, '**Veronica**' (KWS Allemagne, Allemagne), première variété hybride inscrite au catalogue officiel français dont la résistance à la rhizomanie provient de *Beta v. maritima*. Cette variété est la plus cultivée dans sa catégorie en 2002. Cette variété hybride est diploïde et monogermine génétique.

1999, '**Laetitia**' (KWS Allemagne, Allemagne), première variété hybride, diploïde et monogermine génétique, résistante au rhizoctone brun et à la rhizomanie.

1999, '**Angelina**' (KWS Allemagne, Allemagne), première variété cumulant deux résistances à la rhizomanie (origines 'Holly Sugar' et *B. v. maritima*). Cette variété a un excellent comportement dans les sols sévèrement infectés par la rhizomanie de type P. Elle est de type hybride, monogermine génétique et diploïde.

2001, '**Paulina**' (KWS Allemagne, Allemagne), première variété hybride diploïde et monogermine génétique résistante à la rhizomanie et au nématode à kyste.

2004, '**Pauletta**' (KWS Allemagne, Allemagne), première variété tolérante au nématode utilisant une résistance issue de *B. v. maritima*. Cette variété est aussi résistante à la rhizomanie.

Betterave fourragère

1786, '**Disette**', variété de betterave qui présentait plusieurs formes culturales « hors terre » ou « en terre » dont 'Disette blanche à collet vert'.

'**Jaune géante de Vauriac**' (A. Gay, France), '**Géante blanche demi-sucrière**', variétés de betterave fourragère, très utilisées jusque dans les années 1950-60 pour la nourriture hivernale des bovins. La racine très grosse, pauvre en sucre et en matière sèche était arrachée et décolletée à la main (alors que la betterave sucrière était alors arrachée à la fourche et décolletée à la serpe). La productivité était assez faible.

'**Jaune ovoïde des Barres**' (Vilmorin-Andrieux & Cie, France), variété à racine nettement plus petite que celle des précédentes, mais un peu plus riche en matière sèche (12 %) et en sucre.

Années 1960, '**Pajbjerg Rex**' (Pajbjerg, Danemark), '**Otofte Dux**' et '**Guldaeno**' (Dahnfelt, Danemark), variétés de type « fourragère-sucrière », plus riches en matière sèche (15-16 %) et en sucre que les précédentes. Elles ont apporté un progrès important (de l'ordre de 30 %) pour le rendement en matière sèche à l'hectare, ce qui leur a valu un rapide développement. 'Pajbjerg Rex' était la plus riche en sucre. 'Guldaeno' a été obtenue par sélection dans la variété 'Jaune ovoïde des Barres'.

1975, '**Kyros**' (Dansk Planteforædling, Danemark), variété de type « fourragère-sucrière », hybride, triploïde, monogermes génétique, à racine jaune ayant connu un bon succès commercial.

1975, '**Trestel**' (INRA, France), première variété de type « sucrière-fourragère », diploïde, hybride simple de lignées et monogermes génétique. Cette variété de betterave fourragère à racine rose était très homogène.

1992, '**Rimon**' (Desprez Veuve et Fils, France), première variété hybride de type « fourragère-sucrière », triploïde et monogermes génétique, résistante à la rhizomanie. Sa racine est blanche.

1992, '**Jamon**' (Desprez Veuve et Fils, France), variété de type « fourragère-sucrière », hybride, triploïde et monogermes génétique, connaissant encore un beau succès commercial. Sa racine est jaune orangé.

La variété '**Jary**' (1999, Desprez Veuve et Fils, France) a ces mêmes caractéristiques, mais est résistante à la rhizomanie.

1999, '**Colosse**' (INRA, France) et '**Merveille**' (Desprez Veuve et Fils / INRA, France), variétés hybrides de type « sucrière-fourragère », diploïdes à racine respectivement rose et rouge, montrent depuis leur inscription, des performances régulières et élevées.

Remarque. Dans le cas de la betterave, la variabilité est assez importante du fait qu'il n'existe pas de variété prédominante. La variété la plus cultivée ne représente qu'environ 10 % des surfaces. En 2005, 75 % des graines commercialisées

appartenait à la quinzaine de variétés conseillées par l'Institut technique de la betterave (ITB). La sélection a permis de mieux connaître cette diversité et de l'enrichir, notamment grâce à la réalisation de croisements.

Regard sur 50 ans de sélection

Beaucoup de progrès ont pu se faire grâce à une collaboration étroite avec l'USDA (États-Unis). Il est surprenant de constater que la recherche fondamentale pour l'amélioration de la betterave se fasse principalement aux États-Unis alors que toutes les entreprises de sélection sont en Europe. Les travaux de l'USDA ont ainsi permis l'élaboration de géniteurs résistants aux maladies (par exemple, frisolée américaine) et, bien sûr, de géniteurs monogermes. Les importants progrès obtenus dans l'amélioration de la betterave sont d'autant plus méritoires qu'ils sont ralentis du fait que seule la lignée mâle est effectivement travaillée en sélection. En effet, les lignées femelles doivent être porteuses de la stérilité mâle et de la monogermie, ce qui rend difficile toute tentative d'amélioration.

En France, l'INRA a arrêté la sélection de cette espèce depuis 1999. Par ailleurs, le nombre d'entreprises sélectionnant cette espèce est passé d'une vingtaine dans les années 1970 à seulement trois grands groupes et quelques moyennes et petites entreprises, actuellement. Cette diminution a deux explications :

- un certain nombre d'entreprises ont disparu, car elles n'ont pas cru en certaines innovations comme la monogermie ;
- les fusions d'entreprise ont été nombreuses.

L'Italie et la France se partagent la production de semences pour l'Europe.

Caractères importants améliorés

Qualité des semences. Dans les années 1960, un facteur limitant grandement la culture de la betterave était la difficulté de trouver de la main-d'œuvre pour réaliser le démariage. Ce travail d'éclaircissage, qui consiste à enlever les jeunes plantules en surnombre résultant du développement des semences multigerms, rebutait les ouvriers agricoles. Il est, en effet, très pénible du fait de sa délicatesse et parce qu'il est réalisé en extérieur dans des conditions climatiques souvent mauvaises. En plus d'être rares, les démarieurs représentaient un coût difficilement supportable pour les producteurs de betterave. L'amélioration de la faculté germinative du taux de levée et surtout l'introduction de la monogermie (*cf.* encadré ci-contre) ont permis de s'affranchir des besoins en main-d'œuvre et ont sans doute contribué au sauvetage de la culture de cette espèce. De plus, la quantité de semences nécessaires pour un hectare est passée de 20 à 1 kg. Le taux de levée, qui dépend des conditions de production de semences, mais qui présente aussi une origine génétique, est passé de 50 % en 1970 à 85 % dans les années 1990, notamment grâce à la pression exercée par l'ITB sur les entreprises semencières.

Histoire de la monogermie

Deux Ukrainiens, V. Savitsky et Madame Bordonov, inspirés par les travaux de N.I. Vavilov (loi des variations parallèles) après une prospection très importante, ont publié la découverte de la monogermie (la semence provient alors d'une fleur isolée) juste avant la seconde guerre mondiale. Les Ukrainiens, pour des raisons historiques, avaient des rapports tendus et inamicaux avec les Russes. Ainsi, lorsque les Allemands ont envahi la Russie en 1941, Savitsky, comme beaucoup d'Ukrainiens, a collaboré en dispensant des cours à Pozen (Poznan actuellement). À la fin de la guerre, Savitsky, fuyant la haine des Soviétiques, a réussi à passer en Allemagne de l'Ouest où J.S. Mac Farlane de Salinas (Californie, États-Unis) qui connaissant ses publications, est allé le chercher dans un camp de réfugiés en 1945-46. Travaillant ensuite aux États-Unis à l'USDA, il décrit en 1948 des plantes monogermes trouvées dans la variété 'Michigan Hybrid 18' et montre que le caractère de monogermie est monogénique récessif et lié à la sensibilité à la montée à graines (ou montaison). F.W. Owen et Savitsky (USDA, États-Unis) ont transféré la monogermie, d'une part dans un contexte auto-fertile (Sf), et d'autre part dans un contexte mainteneur de stérilité (type O). Owen étant précocement disparu, Mac Farlane a continué ces travaux à Salinas où il a travaillé la résistance à la montée à graines, primordiale pour les semis d'automne dans l'*Imperial Valley* en Californie.

La lignée SLC 101, lignée auto-fertile, très sensible à la montée à graines, peu productive, directement issue de la prospection de Savitsky dans 'Michigan Hybrid 18' et portant le caractère de monogermie, a été diffusée en Europe dans les années 1950 avec le plan Marshall. En 1968, une lignée C 562, monogermie mâle stérile nucléo-cytoplasmique et de type O a été distribuée à tous les demandeurs, elle était du domaine public.

Vis-à-vis de la monogermie génétique, il y a eu en Europe trois attitudes différentes de la part des sélectionneurs encore très nombreux à cette époque :

- une attitude d'ignorance ou de négligence. C'était, depuis 1953, le plein essor des variétés polyploïdes qui avaient permis une augmentation considérable des rendements (en France en 1951-1956, 3,88 tonnes/ha de sucre produit et en 1966-1971, 6,35 tonnes/ha). Par ailleurs, la lignée monogermie SLC 101 était très chétive et de plus autofertile, donc difficile à croiser et à améliorer ;

- une seconde attitude a été celle d'Hilleshög (Suède) qui a réalisé tout un programme de croisements. L'introduction de ce caractère dans le matériel multigerme européen a permis la création des premières variétés expérimentales au début des années 1960, puis de la première variété hybride monogermie compétitive en 1965 ('Monohill', Hilleshög, Suède).

Avec deux variétés de ce type, 'Monohill' et 'Monosvalöf', l'entreprise Hilleshög a pu passer de 1 % à 75 % des parts du marché. Ces variétés sont triploïdes (le niveau tétraploïde du pollinisateur permettant que la sensibilité à la montée à graines du matériel monogermie mâle stérile soit très atténuée sachant que la montée à graines monogénique B est dominante, tandis que la montée à graines polygénique additive est récessive ;

- les Allemands ont eu une troisième attitude. Dans un premier temps, ils n'avaient pas cru à la monogermie génétique. Ils dominaient le marché avec les meilleures variétés polyploïdes et ils avaient, à partir de celles-ci produit d'excellentes semences polies calibrées, « monogermes mécaniques » qui avaient encore augmenté leur suprématie.

L'introduction de la monogermie s'est accompagnée d'une baisse du rendement, le temps que les problèmes de levée se résolvent et que se mettent au point de nouvelles pratiques culturales, en particulier, le désherbage. Il fallait également que les études d'aptitude à la combinaison permettent de détecter les meilleurs hybrides.

D'aucuns auraient pu penser que la monogermie allait monopoliser entièrement le marché. En fait, ce n'est pas le cas, puisque des variétés multigermes sont toujours cultivées dans des pays tels que le Maroc, la Chine, l'Iran et l'Égypte. En effet, dans ces pays, les champs souvent trop petits pour permettre l'utilisation d'un matériel adapté au semis des monogermes et l'irrigation.

Résistances aux maladies

Rhizomanie. La rhizomanie est une maladie causée par un champignon *Polymyxa betae*, vecteur du virus des nervures jaunes de la betterave (*Beet necrotic yellow vein virus*, BNYYV). Cette maladie a commencé à faire des ravages dans les années 1960. Le rendement des champs infestés par cette maladie chutait à environ 1 t/ha. Les recherches menées en Italie et aux États-Unis ont permis de produire les premières variétés tolérantes, sauvant ainsi probablement la culture de cette espèce. La première variété tolérante à cette maladie, 'Rizor', a été inscrite au catalogue officiel en 1986. En 2000, les deux tiers des surfaces cultivées étaient plantées avec des variétés tolérantes à la rhizomanie. Cette proportion est en augmentation. Quatre sources de résistances sont utilisées (une résistance multifactorielle : le type Alba, et trois résistances monofactorielles : le type Rizor (SES-Italie), le type Holly ('Holly Sugar', États-Unis) et le type *maritima* (espèce sauvage, *B. v. maritima*)), ce qui limite le risque de contournement par l'agent pathogène. Une rhizomanie de type P, comportant 5 molécules d'ARN (au lieu de 4 dans les souches classiques de types A ou B), que l'on ne trouvait qu'en Asie, a été introduite en France (à Pithiviers, Loiret) et en Angleterre, probablement à cause de l'implantation ancienne de cultures de safran (*Crocus sativus* L.). Cette souche est très agressive. Les premières variétés cumulant deux sources de résistance sont apparues en 1999 ('Angelina') et se sont avérées très efficaces pour lutter contre la rhizomanie de type P.

Nématode à kyste (*Heterodera schachtii*). Les infestations et dégâts de nématode à kyste sont principalement le fait de durées trop courtes de rotation culturale. Les principaux foyers de nématodes étaient localisés autour des sucreries qui ne détruisaient pas systématiquement les déchets de betterave pouvant contenir des radicules porteuses de kystes. Actuellement, dans pratiquement toutes les sucreries, les déchets (feuilles et radicules) sont lavés, déshydratés et mélangés avec les pulpes sèches. Ainsi, tous les parasites, les spores de champignon, les semences de mauvaises herbes sont détruites. Toutes les variétés résistantes à ce ravageur possèdent le gène *HsI^{pro1}* de *Beta procumbens*. Des variétés porteuses d'une résistance à ce ravageur provenant de *B. v. maritima* sont en cours d'étude et la première variété a été inscrite au printemps 2004 ('Pauletta').

Rhizoctone brun (*Rhizoctonia solani*). Cette maladie fongique est en expansion et commence à poser de sérieux problèmes. L'expression de cette maladie est, de plus, imprévisible, ce qui rend difficile l'évaluation de la résistance des variétés. Depuis quelques années, la sélection est faite par un tri des plantes saines après une infection artificielle très efficace améliorée par l'INRA. Grâce à des travaux réalisés à Fort-Collins aux États-Unis (c'est là que les premières infections artificielles ont été pratiquées), il existe des variétés résistantes à cette maladie.

Cercosporiose (*Cercospora beticola*). Cette maladie fongique est grave car elle cause des taches sur les feuilles qui entraînent une baisse de l'activité photosynthétique pouvant se traduire par des baisses de rendement en sucre atteignant 40 %.

Les croisements effectués avant la seconde guerre mondiale avec des génotypes de *B. v. maritima* du delta du Pô (Station de Rovigo, Italie) sont à l'origine des premières variétés résistantes à la maladie, non seulement en Italie ('Mezzano', 'Alba', 'Cesena', à partir de 1948), mais aussi en Pologne, en Allemagne et en Amérique du Nord. La variété 'Desprez mono RC' (Desprez, 1974) également résistante à la maladie, fait exception car elle a été sélectionnée à partir d'une prospection de 1951, lors d'une année très favorable au *Cercospora* dans le Nord-Pas-de-Calais. Ces variétés possèdent une résistance de type additif qui n'a, jusqu'à présent, pas été contournée par le champignon. Cette maladie a été très importante en France, à l'époque où les porte-graines n'étaient pas protégés. En conséquence, les semences portaient des spores de *Cercospora* (graves attaques de 1951 et surtout 1958 avec 25 % de perte en moyenne en France). Le traitement des porte-graines à partir de 1959, le polissage des semences qui élimine les spores, l'état polyploïde qui s'accompagne d'une moindre sensibilité, ont réduit considérablement la maladie. On assiste actuellement à une recrudescence de celle-ci, sans doute avec le développement nouveau des variétés diploïdes et les étés souvent plus chauds. Actuellement, il n'existe plus de variétés inscrites au catalogue officiel français qui soient résistantes à cette maladie, néanmoins le catalogue européen en contient quelques-unes. Par exemple, 'Dorotea' (Hilleshög, 1997), inscrite en Italie, possède une résistance à la rhizomanie et à la cercosporiose.

Frisolée américaine de la betterave (curly top). Cette maladie causée par un virus et transmise par une cicadelle (*Cirulifer tenellus*) a failli faire disparaître la culture de la betterave au début du XX^e siècle aux États-Unis. Des variétés telles que 'US1' ont été des bonnes sources de résistance à cette maladie.

L'introduction de variétés résistantes et l'amélioration des pratiques culturales ont permis de stabiliser, voire de diminuer les traitements phytosanitaires entre 1980 et 1995. Le rendement en sucre ayant augmenté durant cette période, il est clair que la quantité de pesticides utilisés par tonne de sucre produit a fortement baissé.

Rendement. Le passage aux variétés hybrides et à la triploïdie ont permis d'accroître considérablement le rendement. En 1946, le rendement en sucre blanc était de 3,5 t/ha. En 1993, il est passé à 10 t/ha tandis qu'il était de 12,1 t/ha en 2004. La résistance à la montaison permet de semer plus précocement (20 jours ont été gagnés en 20 ans), ce qui se traduit par une augmentation du rendement estimée à 8 % en 20 ans. La suppression du démariage grâce aux variétés monogermes génétiques a été également une cause importante de l'amélioration du rendement en supprimant le stress qu'entraînait cette pratique et qui durait 2 à 3 semaines.

Qualité industrielle

Teneur en sucre. La teneur en sucre était de 7 à 9 % dans la variété 'Blanche de Silésie' alors qu'elle est maintenant en France de 18 % en moyenne. Cet énorme

progrès pourrait s'expliquer, notamment par les possibilités d'introgression de *B. v. maritima* dans la betterave cultivée. Au cours des vingt dernières années, l'augmentation de la teneur en sucre est estimée à 0,06 %/an. Il est probable que ce taux n'évoluera plus beaucoup, les sucriers ne voulant pas voir apparaître des variétés dont le taux de sucre dépasse 20 % pour des raisons de difficultés de dosage et d'incertitudes dans l'extractibilité du sucre dans de telles variétés.

Rapport sucre mélasse/ richesse en sucre (SM/POL = sucre mélasse/sucre total mesuré à l'aide d'un polarimètre). Ce rapport mesure le pourcentage de sucre qui est retenu (et qui ne pourra pas être extrait) dans les mélasses par l'azote α -aminé, le sodium et le potassium. Depuis 8 ans et, en particulier, sous l'impulsion du Syndicat national des fabricants de sucre de France (SNFS), ce paramètre a été pris en compte pour évaluer la qualité industrielle des racines par le CTPS pour l'inscription des variétés et par l'ITB pour le classement dans la liste des variétés recommandées. Cette mesure a permis de voir apparaître des variétés d'une bien meilleure qualité industrielle, puisque ce paramètre est passé en 12 ans de 11 % à 5 ou 6 %. Cette situation favorable était spécifique à la France et à l'Autriche. Elle s'étend maintenant aux autres pays européens.

Réduction de la tare terre. La tare terre est la quantité importante de terre qui reste accumulée après la récolte au niveau du sillon saccharifère de la racine. La création de variétés avec une tare terre réduite, l'incitation à la qualité promue par un accord interprofessionnel, signé en 1994 et modifié en 2002, et les progrès dans la récolte ont permis en 20 ans de faire passer la tare terre de 35 à 20 % du tonnage livré. Certaines variétés de betterave ('Univers'), du fait d'une forme plus arrondie de leur racine et d'une « peau plus lisse » retiennent jusqu'à 30 % de moins de terre lors de l'arrachage. L'exportation de terre vers les usines est donc limitée, ce qui se traduit par une érosion moins rapide des sols et un traitement plus facile en usine. La sélection génétique pour la réduction de la tare terre n'est pas facile car elle implique un croisement avec la betterave fourragère et donc, une diminution du taux de sucre et de la qualité industrielle. Par ailleurs, des croisements effectués aux États-Unis avec la betterave potagère ont donné un type lisse (*little adhering*, à faible adhérence) hors terre permettant de réduire la tare terre des deux tiers, mais ces betteraves posent de gros problèmes de richesse et de pureté.

Réduction des besoins en azote. La recherche constante de l'amélioration de l'extractibilité par la réduction des teneurs en azote soluble et surtout, l'évolution des techniques culturales avec la mise en pratique de la méthode des bilans, ont permis de réduire fortement les apports azotés dans la culture de la betterave. De 1953 à 2004, la dose d'azote apportée est passée de 240 kg à l'ha à 80 kg pour un rendement en sucre qui a évolué de 3,5 à 11,5 tonnes/ha. La quantité d'azote épandue par tonne de sucre produit a donc été divisée par 10, passant de 70 kg environ à 7 kg environ entre 1953 et 2004. La réduction des apports d'azote a été de 90 %.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique Owen (ou de type O). La monogermie ('Monosvalöf'). La résistance à la frisolée américaine (<i>curly top</i>).
Mutagenèse induite	ESSAIS Au Japon, une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique a été obtenue, mais n'a pas été utilisée (elle a les mêmes mainteneurs que la stérilité mâle d'Owen).
Croisements interspécifiques	OUI avec <i>B. v. maritima</i> : • résistance à la cercosporiose : avant la seconde guerre mondiale, lignée R582 de la station de Rovigo en Italie (beaucoup de variétés aux États-Unis et en Europe du Sud, mais pas en France). Actuellement, des travaux sont en cours, soit à partir d'origines dérivées de la lignée R582, soit à partir de nouveaux croisements <i>B. v. maritima</i> × <i>B. v. vulgaris</i>. • résistance à la rhizomanie : – résistance multifactorielle additive, issue de croisements effectués, avant la seconde guerre mondiale à la station de Rovigo, pour introduire la résistance à la cercosporiose. Le pollinisateur (tétraploïde) de 'Roxane' est issu d'un de ces croisements. C'est la résistance de type Alba ('Ritmo', 'Monodoro', 'Dora') ; – résistance monogénique issue du croisement WB42 × C37 et diffusée par l'USDA sous la forme de la lignée C48. C'est la résistance de type <i>maritima</i> ('Angelina'). • résistance au nématode à kyste ('Pauletta') ; • étude de la génétique de la montaison conduisant à la découverte du gène dominant <i>B.</i> avec <i>B. procumbens</i>, résistance au nématode à kyste ('Nemakill').
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Les betteraves sont naturellement diploïdes. Dans les années 1940, des plantes auto-tétraploïdes ont été obtenues par traitement à la colchicine (Schneider KWS en Allemagne, Peto au Canada). Ces plantes ont servi à réaliser des variétés dites anisoploïdes (ou polyploïdes), mélange d'individus diploïdes, triploïdes et tétraploïdes. Le développement des graines polyploïdes a permis d'obtenir des variétés monogermes mécaniques. Cette évolution s'est accompagnée d'une forte amélioration du rendement. Ensuite, de nombreuses variétés triploïdes sont apparues ('Roxane', 'Amélie').
Transgénèse	ESSAIS 1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur la betterave à la fin des années 1980. De nombreux programmes de recherche dans le monde visent à introduire des caractéristiques diverses : résistance aux herbicides, résistances aux maladies (rhizomanie, jaunisse virale) et aux stress abiotiques (froid, sécheresse,...), production d'autres sucres que le saccharose (fructanes).

suite...

... suite

De nombreux essais aux champs de variétés transgéniques ont été réalisés dans le monde. Par exemple, entre 1987 et 1998, 79 essais ont été réalisés aux États-Unis. En France, seules des variétés tolérantes à des herbicides ou présentant une résistance à la rhizomanie ont fait l'objet d'essais au champ (cf. encadré ci-contre). En ce qui concerne les plantes transgéniques résistantes à la rhizomanie, elles étaient inférieures aux plantes résistantes du type Holly et cette solution a été abandonnée. Depuis 2003, il n'y a plus d'essai de betterave transgénique en France.

OUI
Actuellement, les seules variétés transgéniques existantes sont des betteraves résistantes aux herbicides (cf. encadré p. 130). Elles sont autorisées aux États-Unis, au Canada, au Japon et en Australie, mais elles ne sont pas cultivées.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI La betterave a servi de plante modèle pour des études de morphogenèse sur les conditions de néoformation de bourgeons en culture <i>in vitro</i> . La multiplication par culture <i>in vitro</i> des géniteurs (tétraploïdes) est employée pour la production d'hybrides (difficile).
Sélection sanitaire	AUCUNE Les maladies à virus de la betterave ne se transmettent pas par la semence.
Haploïdisation	OUI La culture d'ovules non fécondés <i>in vitro</i> est pratiquée pour la fixation des caractères de résistance aux maladies (telles que la rhizomanie) ('Avantage').
Recours à la stérilité mâle	OUI Plusieurs stérilités mâles sont utilisées : des stérilités mâles nucléaires pour faciliter les intercroisements et des stérilités mâles nucléocytoplasmiques pour la production d'hybrides (stérilité Owen et celles venant de <i>B. v. maritima</i>).
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI En conditions naturelles, l'autofécondation est impossible, ce qui oblige à avoir recours aux croisements frères-sœurs. Un gène de compatibilité, <i>Sf</i> , est utilisé dans la sélection de lignées consanguines (découverte de Owen).
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires sont utilisés, entre autres, pour l'identification du matériel, les tests d'hybridité, le marquage de la résistance à la rhizomanie (gène <i>Rz1</i> de la résistance de type Holly). Il existe des kits commerciaux de détection de la rhizomanie (tests ELISA). Des tests utilisant des acides nucléiques sont en cours de développement.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale Sélection généalogique Sélection récurrente
Types variétaux	Variété population Variété hybride 3 voies. Cette structure permet l'introduction rapide de nouveaux gènes et de stabiliser la qualité industrielle. Généralement, une lignée mâle stérile diploïde est croisée avec une lignée diploïde mainteneuse de stérilité mâle. La betterave étant très sensible à la dépression de consanguinité, ce croisement restaure la vigueur du porte-graines mâle stérile et améliore la qualité de la production des semences. L'hybride mâle stérile obtenu est ensuite pollinisé par une lignée diploïde ou tétraploïde, selon que l'on souhaite créer une variété diploïde ou triploïde. Variété hybride simple. Quelques variétés hybrides simples ('Trestel') ont aussi été sélectionnées.

Bilan de 5 années d'essais de betterave transgénique tolérante au glyphosate

Le désherbage est un problème majeur dans la culture de la betterave. Avant les années 1970, période où l'usage de désherbants chimiques s'est répandu, cette opération demandait 120 heures de travail manuel à l'hectare. Depuis 20 ans, les champs de betterave sont désherbés par une application moyenne de 2,7 kg (avec une fourchette de 1 à 4 kg) de matière active par hectare en quatre traitements. Ce désherbage repose sur l'utilisation de 3 à 6 molécules différentes.

Cinq ans de tests de culture des betteraves transgéniques tolérantes au glyphosate, réalisés entre 1995 et 2000, ont montré que 2,5 applications de glyphosate (soit 0,7 kg/ha) suffisaient pour contrôler les mauvaises herbes dans un champ de betterave transgénique. Ainsi, l'usage de variétés résistantes au glyphosate présente plusieurs avantages :

Simplicité. 2,5 traitements sont réalisés au lieu de 4. De plus, le désherbage ne nécessite l'usage que d'une seule molécule (glyphosate) au lieu des 3 à 6 traditionnellement utilisées.

Gain en productivité. Le glyphosate permet de contrôler les mauvaises herbes (betteraves sauvages, repousses de pomme de terre, certaines plantes vivaces,...) qui nécessitent normalement des interventions manuelles. Cette meilleure efficacité de désherbage conduit à un gain en productivité estimé à 5 %. Par ailleurs, avec un désherbage classique, des ralentissements de végétation sont observés. Le glyphosate étant très sélectif vis-à-vis des plantes transgéniques, il n'occasionne pas de phénomènes de phytotoxicité, ce qui se traduit par un gain de 3 à 5 % en productivité.

Bénéfice pour l'environnement. Les deux modes de traitements (traditionnel et glyphosate) ont été comparés vis-à-vis de leur nocivité pour l'environnement. L'indicateur environnemental Yardstick (reconnu par les autorités néerlandaises) et l'indicateur d'impact environnemental I-Phy (mis au point par l'INRA de Colmar, Haut-Rhin) ont été déterminés pour les deux modes de traitement. Dans les deux cas, il apparaît clairement que la culture de variétés résistantes au glyphosate est moins polluante et moins toxique pour le sol et les nappes phréatiques que la culture traditionnelle.

Bénéfice économique. Dans le cas où les entreprises privées mettraient sur le marché des variétés résistantes au glyphosate et performantes, et malgré un surcoût des semences de celles-ci, les études économiques montrent qu'il y aurait un bénéfice important pour les agriculteurs (évalué pour la France à près de 12 millions d'euros par an).

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation dans au moins un pays

Résistance aux herbicides à la phosphinothricine. La phosphinothricine est le composé actif des herbicides à glufosinate d'ammonium. Cette substance provoque une diminution de la production de glutamine et une accumulation d'ammoniaque dans les tissus, ce qui conduit à la mort des plantes traitées. L'expression du gène *pat*, provenant des bactéries du sol *Streptomyces viridochromogenes*, permet de conférer une résistance aux herbicides Basta®, Rely®, Finale®, Ignite®, Harvest® et Liberty®. En effet, la protéine codée par ce gène, la phosphinothricine-N-acétyltransférase (PAT), détoxifie la phosphinothricine (composé actif des herbicides) en catalysant l'acétylation. Le fait que les bactéries *S. viridochromogenes* soient présentes partout dans le sol et qu'aucun effet délétère n'ait été déclaré sur l'homme, les animaux ou les plantes, tend à montrer l'innocuité de la PAT.

Résistance au glyphosate. La 5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthétase (EPSPS) est une enzyme, présente exclusivement chez les plantes et les bactéries, qui est responsable de la biosynthèse des acides aminés aromatiques tels que la tyrosine, la phénylalanine et le tryptophane. Le glyphosate, agent actif de l'herbicide Roundup®, agit en se fixant et en inactivant l'EPSPS. Un gène, découvert chez la souche CP4 d'*Agrobacterium tumefaciens*, code une EPSPS insensible au glyphosate (CP4 EPSPS). L'affinité du glyphosate pour la CP4 EPSPS est très faible, ce qui permet aux plantes produisant cette enzyme de résister à l'herbicide. Des animaux nourris avec une alimentation contenant cette protéine n'ont pas eu de problèmes particuliers. Un gène *gox* codant une glyphosate oxydase et provenant de la bactérie *Ochrobactrum anthropi* est aussi introduit dans les plantes dans le but d'augmenter la résistance au glyphosate (pour plus de renseignements, consulter la fiche maïs). Aucun ARNm de ce gène n'a pu être mis en évidence dans les betteraves 'Invigor'™ (GTSB77). La teneur en saponine a été mesurée : elle n'est pas plus élevée dans les variétés transgéniques que dans les variétés traditionnelles.

Perspectives d'amélioration

L'augmentation de l'efficacité de la filière et la compétition vis-à-vis de la canne à sucre dans un contexte de mondialisation (avec un secteur majeur : le Brésil) se traduisent par une diminution régulière des surfaces de betterave sucrière, particulièrement en Europe occidentale. L'augmentation de la compétitivité relative de la betterave à sucre et la recherche de nouveaux débouchés sont donc nécessaires au maintien à long terme de cette culture d'autant que le nouveau règlement européen sur le sucre prévoit une baisse significative de la betterave.

La production maximale de sucre par unité de surface au moindre coût reste l'objectif majeur de la sélection. Il se décline désormais dans un contexte où des caractères comme la tolérance à la sécheresse, la résistance aux maladies, la tare terre, etc. prennent un « poids » de plus en plus important, voire décisif, dans les index de sélection.

Les nouvelles technologies, bien que souvent très coûteuses, s'intègrent progressivement dans les schémas de sélection. Elles améliorent l'efficacité de la sélection à la fois par les nouvelles connaissances qu'elles apportent et par une amélioration des techniques et des critères de choix.

Caractères à améliorer

Rentabilité de la culture. Jusqu'à présent, des droits de douane protègent la betterave produite en Europe vis-à-vis de la canne à sucre produite à l'étranger (en dehors des pays avec lesquels l'Europe a des accords préférentiels), mais cette protection ne durera peut-être pas toujours. En effet, le règlement sucre européen actuel se terminera en 2006, quel que soit le scénario envisagé, le nouveau règlement sera sûrement moins favorable aux producteurs européens. Les producteurs français ne sont pas les plus mal placés en Europe en ce qui concerne le prix de revient et donc la rentabilité de la culture, mais il y a cependant des différences régionales. La betterave est, d'ores et déjà, plus productive mais aussi plus coûteuse à produire que la canne à sucre du fait d'un contexte socio-économique différent. Face à cette situation, la betterave doit continuer de développer sa productivité qui est son principal atout. Des gains en rendement en sucre pourraient, par exemple, être obtenus en allongeant le cycle végétatif grâce à la sélection de variétés tolérantes au gel et résistantes à la montée à graines.

Allongement de la campagne de production. La campagne de production de sucre à partir de la betterave dure environ 90 jours en France. En comparaison, la production de canne à sucre s'étale sur 220 jours. Cette différence entre les durées de campagne de production explique en partie les différences de coût de production. Des stratégies visant à créer des variétés plus précoces et plus tardives, notamment grâce au recours à la transgénèse, sont actuellement en cours d'élaboration.

Qualité industrielle. Des progrès importants dans les capacités de stockage de la betterave et de l'extractibilité des sucres pourraient être obtenus en modifiant le métabolisme de la production du sucre.

Protection de l'environnement. Les réductions de la tare terre, l'augmentation des capacités à valoriser l'azote et l'eau sont aussi des objectifs importants. *B. v. maritima* qui est connue pour croître dans des sols sableux et salins est un réservoir de gènes intéressants pour mieux valoriser l'azote de la betterave.

Résistances aux maladies. Avec le réchauffement climatique, les bio-agresseurs du sud risquent de progresser vers le nord. Il est donc probable que la betterave connaîtra davantage de maladies de feuillage. En plus de l'apparition de nouvelles maladies, il est probable que des maladies déjà présentes, telles que la rhizomanie, les jaunisses virales, le rhizoctone violet (causé par le champignon *Rhizoctonia violacea*), le rhizoctone brun, la maladie des basses richesses (causée par un *Bacteria like organism* (BLO) transmis par une cicadelle) deviendront de plus en plus contraignantes. D'autre part, les consommateurs demandent que la culture s'oriente vers l'agriculture raisonnée en tenant compte de la sécurité sanitaire et de l'environnement. L'obtention de nouvelles résistances aux maladies pour la création de variétés doubles ou triples résistantes est donc l'objectif prioritaire de la sélection de la betterave.

Diversification des produits. Des programmes de modification des sucres, pour produire d'autres glucides que le saccharose, sont aussi en cours.

Techniques à développer

La sélection assistée par marqueurs et la transgénèse semblent être deux techniques importantes pour le futur de l'amélioration de la betterave.

Inscription et protection des variétés en France

1937, ouverture du catalogue betterave fourragère.

1969, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste spéciale semences de betterave sucrière.

1971, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue betterave sucrière.

En 2003, 32 variétés de betterave fourragère (monogermes liste A [31] et liste B [1]; multigermes liste A [7]) et 323 variétés de betterave sucrière (monogermes liste A [240] et liste B [42]; multigermes liste A [3] et liste B [38]) étaient présentes dans le catalogue officiel français et 90 variétés de betterave fourragère et 960 variétés de betterave sucrière au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. En betterave fourragère, le catalogue évolue assez lentement, et on y trouve depuis les variétés anciennes du domaine public jusqu'aux variétés les plus récentes, en passant par des variétés monogermes ayant plus de 20 ans, mais toujours cultivées. En betterave sucrière en revanche, parmi les variétés présentes dans le catalogue de 2003, beaucoup sont très récentes (moins de 5 ans), signe d'un renouvellement très important. L'importance du nombre de variétés de betterave est aussi le signe d'une activité de sélection très intense. S'il est vrai que la sélection de cette espèce demande d'importants moyens, elle est bien valorisée car les semences présentent une haute valeur ajoutée, la propriété industrielle étant garantie par la structure hybride des variétés.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 20 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés de betterave fourragère suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. À l'issue de ces 2 ans, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

En ce qui concerne les épreuves DHS réalisées par le GEVES, le cas de la betterave sucrière est tout à fait particulier : peu de caractères morphologiques

sont disponibles. Il est très difficile de réaliser une véritable description des variétés, donc de distinguer les variétés entre elles comme dans le cas des autres espèces, même si quelques efforts sont actuellement en cours au niveau du CTPS. Il n'existe pas de principes directeurs de l'UPOV pour la betterave sucrière et l'OCVV a établi un protocole (qui comporte 18 caractères descriptifs) pour la DHS en vue de la protection des parents d'hybrides de betterave sucrière, mais il n'existe pas de protocole pour les variétés hybrides elles-mêmes. Il n'y a pas de demande de protection au niveau national en France, en revanche des demandes de protection pour des lignées parentales ont été faites auprès de l'OCVV qui en a confié l'examen aux services suédois. L'utilisation de marqueurs moléculaires pour aider à la distinction des variétés n'est pas souhaitée par la profession. Ceci a pour conséquence qu'un certain nombre de critères agronomiques (VAT) sert à distinguer les variétés. Une autre particularité des variétés hybrides 3 voies de betterave (cas de la plupart des variétés hybrides de betterave) est que celles-ci sont à base génétique large (les caractères de l'un des parents au moins ne sont pas entièrement fixés), ce qui leur confère une plus grande plasticité et une plus grande robustesse que les variétés de type hybride simple. En conséquence, les variétés évoluent d'une année à l'autre. Le faible nombre de critères de distinction et de stabilité rend très difficile le contrôle effectué par le SOC.

Ce système fonctionne du fait de l'implication très forte de l'ITB qui évalue les variétés après leur inscription et établit des listes de variétés recommandées pour les agriculteurs. L'inscription sur cette liste est une étape obligatoire pour qu'une variété connaisse un succès commercial. Ainsi, une non-conformité sur une variété entraînerait sa radiation des listes de l'ITB et donc sa mort commerciale. L'ITB a aussi eu un rôle prépondérant dans l'amélioration de la qualité des semences et dans l'orientation vers la création de variétés résistantes à la rhizomanie.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et son comportement en présence de maladies et de parasites. Une particularité de la betterave est l'importance accordée aux parasites et maladies du sol, pour lesquels la lutte génétique apparaît comme la stratégie la plus efficace et souvent la seule : rhizomanie BNYVV, nématode à kyste *Heterodera schachtii*, rhizoctone brun *Rhizoctonia solani*. Dans ce cas, en plus d'une étude de base réalisée en champs indemnes de maladies, des études supplémentaires sont réalisées, selon les spécificités des variétés, en champs avec présence de la maladie ou du parasite ou avec infection artificielle. Ces essais au champ peuvent être complétés par des tests en conditions contrôlées (test nématode, par exemple). Pour tous ces critères, les variétés candidates sont comparées à des témoins de référence, choisis parmi les variétés les plus cultivées, la plupart du temps parmi les variétés

recommandées par l'interprofession. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs. Mais, dans le cas de la betterave sucrière, les essais CTPS ne sont qu'une première étape, et les résultats doivent ensuite être confirmés dans les essais de l'interprofession : il faut 3 ans d'essais après l'inscription pour qu'une variété puisse être recommandée par l'ITB.

En plus de l'ITB, le SNFS est aussi un organisme qui a eu un rôle prépondérant dans l'amélioration de la betterave, notamment en proposant que la qualité industrielle de la betterave soit évaluée grâce au rapport SM/POL (sucre mélasse/sucre total) et non plus seulement grâce à la richesse en sucre et à la teneur en sucre extractible. Le SNFS réalise aussi des essais, signes que les industriels du sucre portent un grand intérêt à la génétique et à la performance des nouvelles variétés.

Le CTPS a eu un rôle fort dans l'orientation de la sélection de la betterave en intégrant les propositions de l'interprofession dans les évaluations pour l'inscription des nouvelles variétés et en accordant des dérogations aux variétés possédant des caractéristiques intéressantes. Par exemple, les premières variétés résistantes à la rhizomanie ou au nématode à kyste ont été inscrites au catalogue officiel bien que leurs rendements aient été inférieurs respectivement de 8 % ou 15 % à ceux des témoins de l'époque. Toutes ces orientations se sont avérées judicieuses. C'est ainsi qu'actuellement, la majeure partie des variétés cultivées sont résistantes à la rhizomanie et que depuis 2006 toutes les variétés déposées pour l'inscription sont résistantes à la rhizomanie.

Pour en savoir plus

de Biaggi M., Erichen A.W., Lewellen R.T. et Biancardi E., 2003. The discovery of rhizomania resistance traits in sugarbeet. *Proceeding of the 1st joint IIRB-ASSBT Congress*, San Antonio (États-Unis), 131-147.

Biancardi E., de Biaggi M., Campbell L.G. et Skaracis G.N., 2005. *Genetics and breeding of sugar beet*. Science Publishers, Enfield, 388 p.

Rosemark N.O., 1993. La betterave à sucre. Dans : *Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE éditions, Paris, 133-147.

Bonavent J.-F., Bessone L., Geny A., Bervillé A., Denizot J.-P. et Brian C., 1989. A possible origin for the sugar beet cytoplasmic male sterility source Owen. *Genome*, 32 (2), 322-327.

Brian C., 1992. La betterave sucrière. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannetot, éd., INRA Éditions, Paris, 229-242.

Camporota P., 1986. Obtention de la forme sexuée de *Rhizoctonia solani* Kuhn : *Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk. *Agronomie*, 6 (3), 305-307.

CEDUS, 2000. *Sucre et santé, la fin des idées reçues*. Cedus éditions, Paris, 12 p.

CGB (Confédération générale des planteurs de betteraves), 2001. *La betterave en 2001*. CGB édition, Paris, 87 p.

CGBM/CPB, 2002. *L'analyse des bénéfices des OGM*. Rapport de la commission du génie biomoléculaire et du comité provisoire de biovigilance, 24 p.

- Deleplanque J.-P. et Renard O.**, 1981. Les origines lointaines de la betterave sucrière. *Cultivar*, 144, 22-25.
- Desprez M.**, 2000. Évolution de la génétique et de l'amélioration de la betterave sucrière au cours des vingt dernières années. *Proceeding of the 63rd IIRB Congress*, Interlaken, 15-32.
- Desprez M.**, 2002. Évolution de la betterave de 1962 à 2002. *Sél. Fr.*, 53, 35-40.
- Desprez M.**, 2004. Le Professeur Ottavio Munerati : un précurseur dans le domaine de l'amélioration de la betterave sucrière. *Commun. pers.*, 2 p.
- Hosemans D. et Bossoutrot D.**, 1983. Induction of haploids plants from *in vitro* culture of unpollinated beet ovules (*Beta vulgaris* L.). *Z. Pflanzenzüchtg.*, 91, 74-77.
- Istituto Sperimentale per la Cultura Industriali di Bologna. Sezione di Rovigo**, 1979. Sulla Barbatietola di Zuccherò. Raccolta dei principali studi d'Ottavio Munerati dal 1902 al 1949. Atti. Convegno in Commemorazione di Ottavio Munerati, 5-6 oct. Grafiche Erredici, Padova, 2 volumes, 1 646 p.
- Jung C. et Wricke G.**, 1987. Selection of diploid nematode-resistant sugar beet from monosomic addition lines. *Plant Breed.*, 98 (3), 205-214.
- Le Cochec F. et Soreau P.**, 1989. Mode d'action des gènes et hétérosis pour le caractère montée à graines dans le croisement de deux lignées fixées de betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.). *Agronomie*, 9, 585-590.
- Margara J.**, 1970. Néof ormation de bourgeons *in vitro* chez la betterave sucrière, *Beta vulgaris* L. *C.R. Acad. Sci. Paris*, série D, 270, 698-701.
- Margara J.**, 1977. La multiplication végétative de la betterave (*Beta vulgaris* L.) en culture *in vitro*. *C.R. Acad. Sci. Paris*, série D, 285, 1041-1044.
- Margara J.**, 1982. *Bases de la multiplication végétative : les méristèmes et l'organogenèse*. INRA Éditions, Paris, 262 p.
- Mc Farlane J.S., Price C. et Owen F.W.**, 1948. Strains of sugar beets extremely resistant to bolting. *Proc. Am. Soc. Sugar Beet Technol.*, 5, 154-155.
- Moule C.**, 1973. Betteraves. Dans : *Plantes sarclées et diverses*. La Maison rustique, Paris, 99-143.
- Munerati O.**, 1920. Osservazioni e ricerche sulla barbabietola da zucchero. *Atti Reale Accademia dei Lincei*, Rome, CCCXVII, série V, vol. 13 (5), 175-322. (existe en version anglaise : E. Biancardi. ISCI Rovigo, 1999).
- Owen F.V.**, 1945. Cytoplasmically inherited male-sterility in sugar beets. *J. Agric. Res.*, 71, 423-440.
- Panella L. et Ruppel E.G.**, 1996. *Availability of germplasm for resistance against Rhizoctonia species : taxonomy, molecular biology, ecology, pathology and disease control*. B. Sneh, S. Jabaji-Hare, S. Neate et G. Dijat, éd., Kluwer academic Publishers, Dordrecht, 515-527.
- Pelsy F. et Merdinoglu D.**, 1996. Identification and mapping of random amplified polymorphic DNA markers linked to a rhizomania resistance gene in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) by bulked segregant analysis. *Plant Breed.*, 115 (5), 371-376.
- Putz C., Merdinoglu D., Lemaire O., Stocky G., Valentin P. et Wiedermann S.**, 1990. Beet necrotic yellow vein virus, causal agent of sugarbeet rhizomania. *Rev. Plant Pathol.*, 69 (5), 247-254.
- Richard-Molard M.**, 2000. Produire des betteraves plus saines et plus propres. *Proceeding of the 63rd IIRB Congress*, Interlaken, 85-91.
- Ruppel E.G.**, 1972. Correlation of cultural characteristics and sources of isolate with pathogenicity of *Rhizoctonia solani* from sugar beet. *Phytopathology*, 62, 202-205.
- Savitsky V.F.**, 1952. A genetic study of monogerm characters in beets. *Proc. Am. Soc. Sugar Beet Technol.*, 7, 331-338.
- Smeeckens S.**, 1998. A convert to fructans in sugar beet. *Nat. Biotechnol.*, 16 (9), 822-823.
- Steen P. et Petersen H.C.**, 1993. Gene transfer for herbicide resistance. *J. Sugar Beet Res.*, 30 (4), 267-274.

Steinrücken G., 2000. Perspectives and challenges in sugarbeet breeding in the next century. *Proceeding of the 63rd IIRB Congress*, Interlaken, 33-43.

de Vilmorin J.-L., 1923. *L'hérédité chez la betterave cultivée*. Gauthier-Villars et Cie, Paris, 153 p.

de Vilmorin L., 1856. Note sur la création d'une nouvelle race de betterave à sucre. Considérations sur l'hérédité dans les végétaux. *Comptes-Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 2^e semestre, p. 871. Extrait des Notices sur l'amélioration des plantes par le semis et considérations sur l'hérédité dans les végétaux, p. 26.

Le blé tendre

Triticum aestivum (L.) Thell. ($2n = 6x = 42$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation de l'espèce

Le blé tétraploïde est un amphiploïde qui s'est formé par hybridation spontanée, il y a 200 000 à 300 000 ans, par l'addition du génome de l'engrain (*Triticum urartu* Tum. (ex Gandilyan), forme sauvage de *Triticum monococcum* L. – génome A) avec celui d'un *Aegilops* (génome B) aujourd'hui inconnu. Le génome B est voisin du génome S d'*Aegilops speltoides* Tausch. et de ceux d'autres espèces de la même section (*Sitopsis*). La domestication des premiers blés (diploïdes et tétraploïdes) a commencé dès le 10^e millénaire av. J.-C. Elle est passée par la disparition de caractères primitifs favorisant la dissémination des semences (désarticulation des épillets et ténacité des glumes) et l'acquisition de l'aptitude au battage et du caractère « grain nu » (si on exclut l'épeautre). Des données archéologiques suggèrent que l'engrain (*Triticum monococcum*), l'amidonnier (*Triticum dicoccum* Schrank. ex Schübler) et le blé dur (*Triticum durum* (Desf.) Husn.) étaient cultivés en Mésopotamie. Dans les champs d'un de ces blés tétraploïdes (amidonnier), cultivés par l'homme du Néolithique il y a environ 8 000 ans, sont apparus, grâce à la pollinisation fortuite par *Aegilops tauschii* Coss. (anciennement *Aegilops squarrosa* L. – génome D), les blés hexaploïdes primitifs (*Triticum aestivum* (L.) Thell. – génome ABD). Le sens de ce croisement a été confirmé par une analyse des génomes chloroplastiques et mitochondriaux. Cette analyse a aussi montré que le donneur du génome B était le parent maternel initial. Il a fallu attendre le V^e siècle av. J.-C. pour que la culture d'un variant du blé tendre à épi compact, le blé hérisson (*T. aestivum* L. *compactum* (Host) McKey), soit introduit en France aux côtés de la culture de l'engrain et de l'amidonnier. Des traces de culture de l'épeautre (*T. aestivum* L. *spelta* (L.) Thell. – génome ABD) datées de 2 000 ans av. J.-C. ont été trouvées dans le Haut-Rhin. Jusqu'à l'an mille, l'épeautre était la forme de blé hexaploïde la plus cultivée dans le nord de l'Europe. Le caractère vêtu de l'épi d'épeautre entraînait une occupation de place importante dans les charrettes

Historique de l'évolution du rendement du blé

Le rendement des cultures de blé a été étudié dès le Moyen Âge par le clergé : il fallait avoir une idée de la quantité de blé que l'on pouvait prélever aux paysans. En 1156, l'inventaire de l'abbaye de Cluny en Bourgogne signalait qu'un rendement de 4 grains de blé pour 1 semé était habituel en Bresse. Entre le XII^e siècle et la moitié du XIII^e siècle, période correspondant au début de l'ère féodale, de grands progrès ont été obtenus puisque le rendement moyen atteignait probablement 5 pour 1. À cause d'épidémies, de guerres et de famines, il a fallu attendre la fin de la moitié du XVIII^e siècle pour atteindre un rendement de 6 pour 1 (soit environ 9 q/ha). Aujourd'hui, le rendement moyen en blé est proche de 50 pour 1, après une augmentation annuelle de rendement de 1,25 q/ha entre 1960 et 1990.

transportant le grain. Le blé à grain nu (froment) a alors supplanté l'épeautre peu après cette date, du simple fait que l'on pouvait mettre plus de grains de blé que de grains d'épeautre dans une charrette. Durant le Moyen Âge, et jusqu'au milieu du XIX^e siècle, malgré de nombreux bouleversements culturels, le rendement en blé n'a presque pas évolué (cf. encadré ci-dessus).

La fin du XIX^e siècle a été marquée par de grandes disettes. Du blé a alors été importé d'Ukraine et le semis d'un de ces lots de grains a produit la variété population 'Noé', qui a été semée en France abondamment. Durant le XX^e siècle, sauf dans les pays ayant auparavant adopté le lyssenkisme (cf. encadré ci-contre), le rendement a connu un accroissement spectaculaire, à partir de 1960 ou de 1970, selon les pays.

En raison des propriétés particulières de son grain (richesse en énergie, facilité de récolte et de transport), le blé est devenu indissociable de la culture européenne. Avant que le pain ne soit inventé, probablement par les Égyptiens en 1300 av. J.-C., le blé était consommé sous forme de bouillie et de galette dans tout le Moyen-Orient. La symbolique du pain en Occident est très forte. Il est d'abord sacré car source de vie. Il symbolise aussi le droit de tous les peuples à se nourrir.

Le blé est une espèce autogame essentiellement cléistogame (la fécondation se produit avant l'ouverture de la fleur), annuelle et multipliée par semences. Le taux d'allofécondation dans un champ de blé est généralement estimé à moins de 5 %. Néanmoins, la dissémination de pollen et donc, des flux de gènes avec des adventices notamment, sont tout à fait possibles. Le blé peut, en effet, se croiser avec un certain nombre d'espèces sauvages présentes en France (chient *Agropyron* Gaertn., *Aegilops ovata* L.,...). Jusqu'à présent, aucune acquisition de gènes de blé par des adventices phylogénétiquement proches n'a pu être mise en évidence.

Le blé tendre étant une espèce résultant de l'addition, par hybridation naturelle, des génomes de trois espèces différentes, des flux de gènes sont à l'origine d'une des espèces végétales les plus importantes pour l'humanité.

On ne connaît pas de formes sauvages de blé tendre, mais une grande diversité est présente dans les variétés de blé cultivé puisque cette espèce est utilisée

Lyssenkisme et amélioration du blé

T.D. Lyssenko (agronome soviétique, 1898-1976) a toujours rejeté les lois de la génétique découvertes par G. Mendel. Pour lui, l'hérédité n'est pas portée par des chromosomes, qui peuvent être transmis de génération en génération, mais est plutôt une propriété intrinsèque de la matière vivante. Cette croyance a conduit Lyssenko à proposer et à appliquer deux stratégies de son invention à l'amélioration du blé :

— **l'amélioration des semences des plantes autofécondables par croisements entre plantes d'une même variété.** Lyssenko pensait que l'autofécondation était la cause d'une dégénérescence des variétés et qu'il était nécessaire de les rénover grâce à des croisements intravariétaux. Il a donc appliqué cette stratégie à la variété 'Lutescens 062'. Il a créé 4 variétés qui furent toutes sans intérêt (seule la variété '1163' fut cultivée). Plus grave fut l'application de cette théorie pour réformer la production de semences de blé. Tous les blés ont donc dû être castrés par plus de 800 000 fermiers avant d'être pollinisés manuellement par des plantes voisines de la même variété. Cette méthode fut vite abandonnée, malgré la propagande, du fait de sa complexité et de son manque d'efficacité économique ;

— **la modification de la nature des plantes par un traitement physique approprié.** Une variété de blé d'hiver ('Koopertorka') a été transformée en une variété de printemps en plaçant les plantes dans des serres chaudes (ce qui avait pour effet de supprimer le besoin en vernalisation). Cette expérience n'avait rien de scientifique du fait qu'elle n'avait jamais été répétée et qu'elle ne s'appuyait que sur un spécimen (qui pourrait très bien être un mutant, un hybride ou un contaminant). Elle fut cependant une des bases sur lesquelles Lyssenko s'est appuyé pour imposer ses méthodes dès 1936. En janvier 1939, des moyens importants ont été mis en œuvre dans le but de produire des variétés de blé d'hiver destinées à la Sibérie. Selon Lyssenko, il suffisait d'exposer des blés d'hiver au froid pour qu'ils se « rééduquent » et acquièrent la capacité de résister aux hivers sibériens. Malgré de nombreux efforts, et contrairement à ce qu'a affirmé Lyssenko, ce fut un retentissant échec. En dépit de tous ces échecs, un nouveau pas dans l'élaboration du lyssenkisme fut franchi en 1948 quand des savants russes relatèrent la transformation du blé en seigle et *vice versa* grâce à une théorie : une espèce nouvelle peut se créer à partir d'une espèce cultivée dans des conditions défavorables pour elle.

Le lyssenkisme ne fut pas seulement appliqué au blé mais aussi à de nombreuses autres espèces (pomme de terre, betterave,...). En plus de paralyser l'amélioration des plantes, il est aussi à l'origine du lancement de pratiques agronomiques absolument inutiles. Pendant plus de 30 ans, l'Union soviétique a été privée de progrès génétique.

depuis des temps immémoriaux et dans de très nombreux pays. Une partie de cette diversité est en danger du fait qu'elle est située dans des régions devenant arides et politiquement instables. Cette biodiversité est rassemblée dans des collections au Mexique (CIMMYT), en France (INRA), aux États-Unis (USDA) ainsi qu'en Allemagne, en Chine, en Australie, en Russie, etc.

Production et utilisation

Le principal produit récolté, le grain de blé, est un caryopse (fruit sec indéhiscent), constitué d'une graine et de tégléments. La tige sèche, la paille (ou chaume) peut également être récoltée. Elle est utilisée comme litière ou comme aliment pour les animaux.

La production mondiale de blé est estimée à plus de 627 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine (91,3 millions de tonnes), l'Inde (72,1 millions de tonnes), les États-Unis (58,7 millions de tonnes), la Russie (45,4 millions de tonnes) et la France (39,7 millions de tonnes) (données FAO, 2004). La France est un pays exportateur. En 1998, plus de 5 millions de tonnes (16 % de la production totale française) étaient destinés aux pays du Tiers Monde. La demande mondiale de blé pour 2020 est estimée à 1 milliard de tonnes. Le blé a de multiples utilisations. En 2002, la production française se répartit de la manière suivante :

- 55,1 % sont exportés principalement pour la panification ;
- 15,7 % servent à la fabrication de la farine. La mouture du grain de blé permet d'obtenir de la farine. Le grain de blé se distingue par sa qualité meunière (capacité du grain à être transformé en farine : rendement en farine). Des farines ayant des qualités physico-chimiques différentes sont recherchées en fonction des différentes utilisations possibles (fabrication de pain, viennoiserie, biscuits, biscottes,...). Par contre, il faut préciser que le blé légume (« blé Ebly ») qui est apparu assez récemment est obtenu à partir de blé dur ;
- 21,3 % servent à l'alimentation animale. Le blé fourrager représente un bon apport énergétique et protéique. Le grain de blé est utilisé couramment sous forme broyée. Le son, produit secondaire de la mouture du blé, est aussi souvent incorporé à la nourriture animale. L'Amérique du Nord et l'Australie n'utilisent pas le blé en nutrition animale ;
- 7,9 % servent à l'industrie. La glutennerie permet l'extraction du gluten, formé par un mélange de deux familles protéiques (les gliadines et les gluténines) qui représentent les trois quarts des protéines totales du grain de blé. Par ses propriétés viscoélastiques et ses propriétés nutritionnelles, le gluten est un composant essentiel dans la fabrication de pain. Il est souvent aussi utilisé en alimentation animale, dans l'industrie agroalimentaire (épaississant, émulsifiant et liant), dans l'industrie pharmaceutique (enrobage des médicaments) et dans l'industrie cosmétique (shampoings, crèmes de beauté). L'amidonnerie est l'industrie permettant l'extraction de l'amidon. L'amidon et ses dérivés ont des applications multiples dans l'agroalimentaire et il est aussi utilisé pour la production d'éthanol par fermentation. En fait, les industries de l'amidonnerie et de la glutennerie fonctionnent de concert et, selon les cours, le gluten est le coproduit de l'amidon ou l'inverse. La tendance actuelle est aussi d'essayer de valoriser certains composés du grain présents en faible quantité, mais de haute valeur ajoutée.

Histoire des variétés cultivées en France

Les variétés de blé sont notamment désignées en fonction de la durée du cycle végétatif. Ainsi, on distingue principalement trois catégories : le blé d'hiver, le blé de printemps et le blé alternatif.

Le blé d'hiver est un blé qui, pour accomplir l'ensemble de son cycle, doit recevoir des températures vernalisantes (environ 8 semaines à des températures inférieures à 8 °C). Il est nécessairement semé à l'automne (d'où l'autre appellation synonyme : blé d'automne).

Le blé de printemps est un blé qui ne nécessite pas de températures vernalisantes pour accomplir l'ensemble de son cycle. Il est, en général, semé à la sortie de l'hiver.

Le blé alternatif est un blé qui a un besoin plus faible en températures vernalisantes que le blé d'hiver (entre 2 à 6 semaines environ) pour accomplir l'ensemble de son cycle. Il est semé soit en automne, soit dans le courant de l'hiver.

Variétés anciennes

Elles sont toutes de type hiver.

'Rouge d'Alsace', exemple de « blé de pays ». C'était une variété population, cultivée dans l'est de la France, constituée d'un mélange de lignées pures et de structures plus ou moins hétérozygotes, et possédant une certaine adaptation au froid.

1826, **'Noé'**, variété population diffusée par le marquis de Noé puis par Plante, meunier à Nérac (Lot-et-Garonne). C'est un exemple de « blé d'Aquitaine », sélectionné dans des variétés populations importées de Russie pour la consommation au XIX^e siècle. Cette variété s'est répandue dans le Sud-Ouest et la Région parisienne.

1850 environ, **'Chiddam d'automne'** et **'Squarehead'**, exemples de variétés d'origine anglaise qui ont été cultivées dans le nord de la France. Ces variétés de « blé anglais » étaient tardives, productives et assez résistantes à la verse et à la rouille jaune, mais le grain n'avait qu'une faible valeur boulangère.

Après 1850, **'Rouge de Bordeaux'**, **'Japhet'** et **'Gros Bleu'**, exemples de variétés, proches du type lignée pure, obtenues à partir de la variété 'Noé'. Ces variétés étaient précoces et avaient une bonne valeur boulangère, mais n'avaient qu'une résistance moyenne à la verse et étaient sensibles au froid et à la rouille jaune.

1884, **'Dattel'** (Vilmorin-Andrieux, France), première variété de blé obtenue par Henry de Vilmorin après croisements raisonnés et application d'un début de sélection généalogique. Cette variété résulte du croisement entre deux variétés de « blé anglais ». Cette variété constitua un progrès certain par rapport aux variétés de l'époque et fut cultivée jusqu'à dans les années 1940.

1889, **'Bordier'** (Vilmorin-Andrieux, France), variété obtenue après croisement entre 'Noé' et 'Prince Albert'. C'est la première d'une série de variétés résultant de croisements entre une variété de « blé d'Aquitaine » et une variété de « blé anglais », effectués pour réunir les qualités respectives de ces deux types de blé. À sa suite, les variétés 'Bon Fermier' (1905) et 'Hâtif inversable' (1908) connaîtront un grand développement jusqu'à dans les années 1920.

1922, '**Institut Agronomique**', variété obtenue par le professeur Schribaux après hybridation entre géniteurs d'origines diversifiées [(‘Riét’ × ‘Épi carré’) × ‘Hâtif inversable’]. Ces géniteurs qui présentent des résistances au froid et aux rouilles ont concouru à la création de variétés ayant une bonne régularité de rendement.

Variétés récentes

1933, '**Vilmorin 27**' (croisement effectué en 1910, Vilmorin-Andrieux, France), variété d'hiver qui, pour l'époque, est courte et résistante à la verse. Pendant 25 ans, cette variété a été la plus cultivée en France, malgré sa faible résistance au froid.

1946, '**Cappelle-Desprez**' (Desprez, France), variété d'hiver ayant une certaine résistance au piétin-verse. Cette résistance est la seule qui existe dans les variétés actuelles cultivées au nord-ouest des États-Unis. Cette variété s'est aussi distinguée par une bonne résistance à la verse et une résistance partielle à la rouille jaune qui s'est avérée durable. Elle a représenté plus de la moitié des emblavements durant plus de 10 ans en France. Elle a aussi connu un vif succès en Grande-Bretagne.

1950, '**Étoile de Choisy**' (INRA, France), première variété d'hiver issue de sélection qui soit véritablement adaptée au Sud-Ouest et qui a bouleversé l'agriculture dans cette région. La précocité de cette variété, lui conférant une bonne résistance à l'échaudage provient d'une variété italienne. Cette variété est résistante aux deux mosaïques.

1959, '**Champlein**' (Claude Benoist, France), variété d'hiver régulièrement très productive, adaptée à la zone Nord, et qui a eu un grand succès commercial.

1964, '**Capitole-Vilmorin**' (Vilmorin-Andrieux, France), variété d'hiver ayant une bonne qualité boulangère et un bon rendement et qui a connu un bon développement. Cette variété est résistante aux deux mosaïques.

1966, '**Joss**' (Cambier, France), variété d'hiver dont la carrière commerciale s'est trouvée brisée du fait du contournement de sa résistance à la rouille jaune.

1973, '**Maris-Hunstman**' (Plant Breeding Institute, Royaume-Uni), variété d'hiver possédant un très bon rendement, qui a connu un grand succès commercial, bien qu'elle soit non panifiable. C'est une des variétés possédant le gène *Pm6* de résistance à l'oïdium, provenant de *T. timopheevi* (Zhuk.) Zhuk.

1973, '**Talent**' (Claude Benoist, France), variété d'hiver de blé court (elle possède le gène *Rht8*, *Reduced height*, c'est-à-dire hauteur réduite, provenant de la variété japonaise 'Akakomugi' via la variété italienne 'Fortunato'), tallant très bien, ayant une grande souplesse d'adaptation et une productivité élevée.

1974, '**Courtôt**' (INRA, France), première variété demi-naine de blé d'hiver inscrite au catalogue officiel français. Elle cumule les allèles de nanisme *Rht1* et *Rht2* (provenant de variétés japonaises) et possède une très bonne valeur

boulangère. Cette variété n'est pas résistante aux rouilles et doit son succès commercial à la découverte de fongicides systémiques efficaces.

1974, '**Clément**' (Cebeco, Pays-Bas), une des premières variétés d'hiver possédant l'introgression 1B/1R du seigle portant le gène *Pm8* de résistance à l'oïdium. Cette variété a une piètre valeur boulangère, mais une productivité exceptionnelle et de nombreuses résistances aux maladies.

1976, '**Roazon**' (INRA, France), première variété d'hiver porteuse de deux introgressions provenant d'*Aegilops ventricosa* Tausch. : *Yr17-Lr37-Sr38* (sur le chromosome 2A) contenant des gènes de résistances aux rouilles jaune, brune et noire et l'introgression porteuse du gène *Pch1* (sur le chromosome 7D) conférant une résistance au piétin-verse. Cette variété s'est avérée impossible à commercialiser du fait de sa sensibilité à la septoriose et à l'oïdium, de sa faible valeur technologique et de sa productivité un peu faible. Toutes les variétés actuelles résistantes au piétin-verse possèdent l'introgression porteuse du gène *Pch1*, via les progéniteurs de 'Roazon'.

1978, '**Fidel**' (Pichot, France), variété de blé alternatif ayant un bon rendement et une assez bonne qualité boulangère. Cette variété, obtenue par un agriculteur beauveron passionné par la sélection, est résistante aux deux mosaïques.

1980, '**Camp Rémy**' (UNISIGMA, France), variété d'hiver se caractérisant par une excellente qualité boulangère.

1981, '**Festival**' (Claude Benoist, France), variété d'hiver se distinguant par son rendement.

1983, '**Thésée**' (Verneuil Recherche, France), variété d'hiver ayant connu une bonne réussite commerciale en raison de sa bonne valeur agronomique et de son adaptation à des environnements variés.

1985, '**Courtel**' (INRA, France / Pichot, France / Rohm and Haas, États-Unis), première variété hybride F₁ de blé inscrit au catalogue officiel français. Le contrôle de la fécondation croisée est assurée par traitement chimique gamétocide. C'est une variété de blé alternatif.

1987, '**Florin**' (Lepeuple, France), première variété d'hiver issue d'haplométhode inscrite en France.

1988, '**Soissons**' (Desprez Veuve et Fils, France), variété d'hiver demi-naine précoce cumulant un bon rendement, une bonne qualité boulangère et une très large zone d'adaptation. C'est la plus récente des variétés qui ait dépassé 40 % de la superficie en culture.

1989, '**Renan**' (INRA, France), variété d'hiver exceptionnelle car cumulant des résistances aux rouilles, au piétin-verse, à la septoriose et à la fusariose tout en conservant une très haute valeur boulangère et une bonne tolérance au froid. C'est la variété idéale pour l'agriculture raisonnée. Elle est un peu moins productive et un peu plus sensible à la verse, dans des conditions de forts intrants, que les variétés modernes.

Importance des croisements interspécifiques chez le blé

L'hybridation interspécifique est une stratégie ayant permis d'introduire un grand nombre de gènes de résistances dans le blé :

- ainsi, toutes les variétés de blé présentant un niveau élevé de résistance au piétin-verse possèdent le gène *Pch1* provenant d'*Aegilops ventricosa* ;
- le linkat *Yr17-Lr37-Sr38-Cre5* conférant des résistances aux rouilles jaune, brune et noire et au nématode à kyste (*Heterodera avenae*) est présent dans environ 1/3 des variétés récemment inscrites au catalogue officiel français. Ce linkat provient également d'*Aegilops ventricosa* ;
- l'introgression 1B/1R (une partie du chromosome 1B du blé est remplacée par un fragment du chromosome 1R du seigle) est présente dans un petit nombre de variétés en France, mais elle est très utilisée en Europe du Nord. Elle porte le gène *Pm8* de résistance à l'oïdium. Ces trois exemples sont les plus cités dans la littérature et ces introgressions sont probablement celles qui sont les plus utilisées en France. Cependant, beaucoup d'autres gènes ont aussi été introduits par croisements interspécifiques comme le gène *Pm6* de résistance à l'oïdium provenant de *T. timopheevi*. Entre 1995 et 1998, 30 variétés nouvellement inscrites possédaient *Pm6* et seulement 4 contenaient *Pm8*.

1994, '**Shango**' (PBIC, Royaume-Uni), variété d'hiver tardive, recommandée par la meunerie, alliant stabilité des caractéristiques technologiques et bonnes performances agronomiques (rendement, résistance à la verse et aux maladies).

1995, '**Hyno-rista**' (DuPont Hybrinova, France), variété d'hiver hybride F₁ entre 'Soissons' et 'Renan', cumulant les résistances, la rusticité et le rendement de 'Renan' avec la qualité de 'Soissons'.

1998, '**Apache**' (Nickerson SA, France), variété de blé d'hiver recommandée en meunerie se caractérisant notamment par une bonne teneur en protéines. Avec environ 24 % des surfaces emblavées, c'est la variété la plus cultivée en France en 2002/2003.

Remarque. La variabilité cultivée ne représente qu'une infime partie de la biodiversité mondiale, un nombre relativement restreint de géniteurs ayant été utilisé. Cependant, pour introduire une variabilité nouvelle, les sélectionneurs français ont utilisé des gènes de résistances aux maladies provenant de croisements interspécifiques (cf. encadré ci-dessus) et certains gènes de nanisme issus de variétés italiennes ou d'Extrême-Orient.

Regard sur 50 ans de sélection

L'amélioration du blé s'est considérablement accélérée. Alors qu'il a fallu 150 ans entre 1800 et 1950 pour à peine doubler le rendement, celui-ci a plus que triplé au cours des 50 dernières années.

L'introduction de gènes de nanisme a été un facteur clé dans le progrès génétique. Les premières variétés porteuses de gènes de nanisme sont apparues en France au début des années 1970. Actuellement entre 2/3 et 3/4 des variétés inscrites au catalogue officiel français possèdent au moins un gène de nanisme.

Avec la réduction de la taille de la tige, les variétés sont devenues plus résistantes à la verse, ce qui a fortement contribué à régulariser le rendement et la qualité. Ces variétés ont aussi l'avantage de mieux valoriser l'azote et leur utilisation a permis d'intensifier la culture.

Au cours de ces 50 dernières années, de très nombreuses résistances à diverses maladies telles que le piétin-verse, l'oïdium ou les rouilles ont été introduites grâce, notamment, à des croisements interspécifiques. Actuellement, il existe des variétés qui cumulent des résistances et qui peuvent être cultivées avec un nombre très réduit de traitements fongicides.

La qualité boulangère n'a pas été oubliée par les sélectionneurs : la force boulangère des variétés a été notablement améliorée.

Caractères importants améliorés

Rendement. Le rendement a stagné à 10 q/ha pendant tout le XIX^e siècle et jusqu'en 1945. Il a augmenté de 1,25 q /ha/an depuis 1956. Plus du tiers de ce progrès peut être imputé à la sélection. Le rendement en grain est un caractère génétiquement complexe et son amélioration passe par la sélection conjointe de la productivité et des caractères adaptatifs aux milieux biotiques (les parasites animaux et végétaux) et abiotiques (le milieu agroclimatique et les stress). L'amélioration génétique du rendement se fait généralement de manière progressive et continue avec une modification de ses composantes (le peuplement en grains et la masse du grain), les variétés améliorées pouvant privilégier l'une ou l'autre des composantes. Il arrive, dans des circonstances particulières, que le rendement progresse de manière spectaculaire comme ce fut le cas en Inde au cours de « la révolution verte » (*cf.* encadré ci-dessous).

Résistance à la verse. L'utilisation de gènes de nanisme, conférant au blé une taille de tige courte et provoquant des gains substantiels dans la résistance à la verse, est le fait marquant de la révolution verte.

Rusticité. La comparaison des variétés récentes et des variétés anciennes, dans différentes conditions de culture, a été réalisée dans le cadre de plusieurs études scientifiques. Ces études démontrent que, dans des conditions de culture à forts intrants (azote et produits phytosanitaires), un grand progrès a été réalisé. Ce progrès est plus faible, mais néanmoins sensible, dans des conditions à faibles intrants. Contrairement aux idées reçues, les variétés modernes sont plus rustiques que les variétés anciennes. Ceci confirme l'intérêt de la poursuite d'un

Évolution du rendement en Inde

En Inde, le rendement de blé était de 6,5 q/ha en 1950 et de 24,7 q/ha en 1998. L'Inde est ainsi passée du stade de pays importateur à celui de pays exportateur de blé lui permettant de limiter une famine sans précédent. L'utilisation de variétés plus productives et à paille courte est à l'origine de cette révolution agricole.

programme spécifique pour améliorer le caractère de rusticité qui privilégierait, entre autres, les caractères de résistance aux maladies et d'aptitude à mieux valoriser l'azote.

Résistance aux maladies. Des gènes de résistance à plusieurs maladies fongiques telles que le piétin-verse (dû à *Pseudocercospora herpotrichoides*), à différentes rouilles (jaune due à *Puccinia striiformis*, brune due à *P. tritricina* et noire due à *P. graminis*), à la septoriose (due à *Sagonospora nodorum* et *Septoria tritici*) et à l'oïdium (dû à *Blumeria graminis*, anciennement *Erysiphe graminis*) ont été introduits avec succès, notamment grâce à l'usage des croisements interspécifiques (cf. encadré p. 144). Par ailleurs, les mosaïques du blé sont des maladies virales occasionnant des pertes de rendement pouvant atteindre 20 à 25 q/ha (il y a un effet climat et certaines années il y a très peu d'expression de la maladie dans les parcelles contaminées). Ces maladies sont en extension et 25 % des communes en France possèdent au moins un champ contaminé. La sélection a permis d'obtenir environ quarante variétés résistantes aux deux mosaïques : la mosaïque striée du blé ou mosaïque des stries en fuseau du blé, causée par le virus de la mosaïque des stries en fuseau du blé (VSFB ou *Wheat streak mosaic virus*, WSMV) et la mosaïque jaune du blé ou mosaïque du blé, causée par le virus de la mosaïque du blé (VMB ou *Yellow mosaic virus*, YMV). Certaines variétés cumulent de nombreux gènes de résistances ('Renan', 'Virtuose',...) et peuvent donner des rendements satisfaisants avec un seul traitement fongicide.

Qualité boulangère. La qualité du grain pour la fabrication du pain s'est constamment améliorée en s'adaptant aux méthodes industrielles. Un fait notable est que les variétés cultivées de l'immédiat après-guerre seraient maintenant considérées comme impropres à la panification par les techniques modernes. La force boulangère, qui dépend en grande partie de la quantité et de la qualité du gluten, est mesurée par l'indice W de l'alvéographe Chopin. Il est de 120 pour 'Vilmorin 27' et de 240 pour 'Soissons', ce qui montre bien tout le progrès qui a été réalisé dans l'amélioration de ce caractère (cf. encadré ci-dessous).

Doit-on faire de la sélection pour des critères que la technologie peut améliorer ?

Cette question se pose pour toutes les espèces ayant des débouchés industriels. Dans le cas du blé, la réponse à cette question est clairement positive. Les modifications des qualités du blé ont, dans une certaine mesure, conduit les industriels à faire évoluer leurs techniques de panification. La technologie coûte cher et chaque fois que des solutions génétiques sont découvertes, celles-ci sont exploitées et permettent la réalisation d'économies immédiates. Dans le cas du blé, la demande des industriels a aussi exercé une pression sur les sélectionneurs pour que les variétés évoluent : une variété acceptée sur la liste recommandée par la meunerie a plus de chance d'être beaucoup cultivée. Ce sont les industriels qui définissent les critères d'accession à cette liste.

Difficultés et obstacles

Taux de protéines. Il existe une corrélation négative entre le taux de protéines et le rendement. Au cours des dernières années, une légère baisse du taux de protéines a été enregistrée. Ce problème est inquiétant car des taux élevés de protéines sont requis pour la fabrication du pain, pour la nutrition animale et également pour les marchés d'exportation.

Deux incidents. Au moment de leur inscription au catalogue officiel français, les variétés 'Moulin' et 'Pernel' étaient très prometteuses. Malheureusement, sous certaines conditions climatiques, il est apparu des problèmes de stérilité pouvant provoquer des pertes de rendement en grain parfois très conséquentes. Des recherches ont montré que dans des conditions de faible luminosité, la méiose mâle est perturbée, ce qui se traduit par une stérilité plus ou moins complète du pollen, la fertilité femelle n'étant pas affectée. Des agriculteurs ayant subi des pertes importantes sur des cultures de 'Moulin', ont attaqué en justice l'entreprise qui représentait l'obteneur en France (*cf.* encadré ci-dessous).

Cas de 'Moulin' et 'Pernel'

En 1987, une perte de rendement variant de 0 à 80 % a été observée sur les variétés de blé tendre 'Moulin' (PBI, Royaume-Uni) et 'Pernel' (INRA, France) essentiellement dans les régions de Bretagne et de Normandie. En première analyse, ces pertes ont été attribuées à un « gel d'épi » consistant, en fait, en une destruction des organes reproducteurs liée à des températures basses au mois de mai.

Sur la base du recueil de données climatiques et de l'examen de la diversité du comportement de ces variétés selon les zones, les dates de semis, l'exposition des parcelles et la structure du sol, il s'est avéré que les causes de ce phénomène étaient beaucoup plus complexes. En fait, il s'agissait d'un faible éclaircissement reçu par la plante à un stade précoce du développement des organes de reproduction et à un stade précis de la méiose. Le faible éclaircissement reçu en fin d'hiver, puis au printemps en 1987, a conduit à une forte expression de ce phénomène. La conjonction des facteurs agissant sur le développement des plantes et la coïncidence avec la fenêtre climatique ont conféré un caractère exceptionnel à cet événement, jamais clairement identifié, ni expliqué précédemment.

Son ampleur a conduit de nombreux agriculteurs à tenter une action devant différents tribunaux mettant en cause les obtenteurs et les établissements fournisseurs de semences. Cet événement a permis d'illustrer le fait que la connaissance des variétés résultant des différentes expérimentations conduites par l'obteneur, les services officiels, les instituts techniques ou les prescripteurs ne permet pas de fournir une garantie absolue de résultats. La complexité des interactions entre la génétique, l'environnement et les modalités de conduite de la culture maintient une dimension aléatoire à la production agricole et nécessite de la part de chacun des acteurs, une gestion raisonnée des risques.

Des dispositions ont été prises à la suite de ces événements. Le phénomène a concerné essentiellement les deux variétés 'Moulin' et 'Pernel' alors que d'autres variétés étaient cultivées dans les mêmes zones, ce qui signifie clairement que ce phénomène a une composante génétique. Des travaux engagés notamment par l'INRA de Rennes ont permis de mieux comprendre l'origine de cet incident.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Les allèles de nanisme <i>Rht1</i> et <i>Rht2</i> proviennent de la lignée japonaise 'Norin 10'. En 1993, ces deux allèles étaient déjà utilisés dans plus de la moitié des variétés mondiales. Le gène <i>Ph</i> (<i>Pairing homeologous</i>, appariement homéologue) impliqué dans le contrôle de la méiose du blé tendre, fait que cette espèce se comporte comme un diploïde strict. Des lignées avec un gène <i>Ph</i> non fonctionnel, ont été utilisées pour réaliser des recombinaisons entre chromosomes homéologues. Dans le monde entier, des programmes visent le clonage de ce gène, qui est de la plus haute importance scientifique et biotechnologique. Les gènes <i>Kr1</i> et <i>Kr2</i> inhibent l'aptitude du blé à se croiser avec d'autres espèces telles que le seigle. La variété 'Chinese Spring' de faible valeur agronomique possède deux allèles non fonctionnels de ces gènes. Des travaux visant au clonage de ces gènes sont en cours.
Mutagenèse induite	ESSAIS en France Essais infructueux pour obtenir des résistances à la septoriose (<i>Sagamospora nodorum</i>) et acquérir un caractère de nanisme. OUI à l'étranger Tolérance aux imidazolinones. La mutagenèse chimique de la variété 'Fidel' a permis d'obtenir une tolérance à cet herbicide. Ce caractère a été introgressé par rétro-croisements dans la variété 'Grandin'. Plus de 150 variétés issues de mutagenèse induite ont été enregistrées auprès de la FAO/IAEA. Certaines connaissent un franc succès : ainsi, une variété chinoise est cultivée sur plus de 700 000 ha et la variété 'Jauhar-78' a été cultivée au Pakistan sur plus de 50 000 ha pendant plus de sept ans. Du fait de sa remarquable tolérance à la sécheresse, la culture de cette dernière variété a apporté aux cultivateurs un revenu appréciable.
Croisements interspécifiques	De nombreux travaux ont été effectués dans le but d'introgresser des caractères (par exemple, remplacement d'un chromosome de blé par un chromosome de seigle,...). OUI en France <i>Ae. tauschii</i> – Gènes <i>Lr21</i> et <i>Lr22a</i> (résistance à la rouille brune). <i>Ae. ventricosa</i> – Gène <i>Pch1</i> (résistance au piétin-verse – 'Roazon'). <i>Ae. ventricosa</i> – Introgression <i>Yr17-Lr37-Sr38</i> (résistances aux rouilles – 'Roazon'). <i>T. dicoccoides</i> (Körn ex Aschers & Graebn.) Thell. – Gène <i>Yr15</i> provenant de <i>T.d.</i> G25 (résistance à la rouille jaune – 'Dippes Triumph') et gènes <i>Pm16</i>, <i>Pm26</i>, <i>Pm30</i> et <i>Pm31</i> (résistances à l'oïdium). <i>T. monococcum</i> – (résistance à la rouille noire et à différents pucerons). Blé × orge et orge × blé. OUI à l'étranger (quelques exemples,...) <i>Ae. ovata</i> L. (résistance au virus de la mosaïque striée du blé ou WSMV). <i>Ae. ovata</i> (haute teneur en protéines – 'Encore', 'Frontiers-Man',...).

suite...

... suite

Seigle (*Secale cereale* L.) – Introgression 1B/1R sur laquelle se trouve des gènes d'intérêt tels que : le gène *Pm8* (résistance à l'oïdium), le gène *Yr9* (résistance à la rouille jaune) et le gène *Lr26* (résistance à la rouille brune). Certaines variétés, qui possèdent une introgression 1B/1R concernant un fragment chromosomique de grande taille, cumulent ces trois gènes de résistances.
S. cereale (résistance à la rouille de la tige – 'Virest', 'Elia',...).
S. cereale (résistance au froid – 'Terminillo').
Thinopyrum (ex *Agropyron*) *intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey (résistance aux rouilles – 'Weique', 'Sin Su Guan').
Th. elongatum (Host) D. R. Dewey (résistance à la sécheresse – 'Siao Yen 4').
T. timopheevi – Gènes *Pm4b*, *Pm6* (résistance à l'oïdium – 'Apollo', 'Thésée').

Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE Le blé tendre est un allohexaploïde provenant de l'addition par hybridation naturelle de 3 génomes différents.
Transgénèse	ESSAIS 1^{re} transformation. Les premières réussites dans la transformation par biolistique et dans la régénération de blé transgénique ont été enregistrées en 1992. Plusieurs laboratoires dans le monde pratiquent, à présent, la transformation du blé par biolistique ou à l'aide d' <i>Agrobacterium tumefaciens</i> . Essais aux champs et caractères étudiés. En 2000, avaient été réalisés aux États-Unis 55 essais au champ de variétés transgéniques résistantes aux herbicides ou aux bio-agresseurs (virus et champignons), avec des compositions modifiées en gluten ou en amidon, avec un meilleur rendement ou possédant un mécanisme génétique permettant la production de variétés hybrides. Il y a en Chine, depuis 1999, au stade des essais au champ, des variétés transgéniques résistantes au virus de la jaunisse nanisante de l'orge (<i>Barley yellow dwarf virus</i> , BYDV) et d'autres dont la qualité du grain a été améliorée. Autorisation de commercialisation. Il ne semble donc pas exister encore de variété transgénique de blé, autorisée à commercialisation dans le monde. Les premières variétés de blé transgénique cultivées le seront probablement aux États-Unis (variété résistante au glyphosate [Monsanto] ou résistante à la fusariose [Syngenta]).

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	OUI Les méthodes d'haploïdisation sont la culture d'anthères <i>in vitro</i> et le croisement intergénérique avec le maïs suivi d'un sauvetage d'embryons <i>in vitro</i> . L'haplodiploïdisation est utilisée pour la fixation rapide des lignées et leur évaluation en situation homozygote.

suite...

... suite

L'haplométhode sert à la création de lignées ('AJ536', 'NH535', 'BA701',...) pour la réalisation de variétés lignées pures ('Florin') et de variétés hybrides.

De nombreux programmes de cartographie génétique utilisent des lignées fixées recombinantes obtenues par haplodiploïdisation.

Recours à la stérilité mâle **OUI en France**

Une stérilité mâle peut être induite chimiquement à l'aide d'un gamétocide pour la production de semences de variétés hybrides F₁ ('Courtel', 'Cockpit', 'Sextant', 'Mercury', 'Domino'). Les variétés hybrides de la série 'Hyno' sont réalisées avec le gamétocide Croisor®.

Des stérilités mâles nucléaires sont utilisées pour faire du brassage génétique de matériel.

OUI à l'étranger

Il existe des stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques provenant, par exemple, de *T. timopheevi*. Les essais de restauration de la fertilité n'ont pas donné satisfaction en France, ce qui a limité l'intérêt de ces cytoplasmes. Par contre, des stérilités mâles de ce type sont utilisées à une échelle commerciale en Chine et en Afrique du Sud.

Recours à l'auto-incompatibilité **AUCUNE**

Marquage moléculaire **OUI**

L'analyse des sous-unités des gluténines et celle des gliadines par électrophorèse sont effectuées depuis les années 1980.

Il existe de nombreuses cartes génétiques du génome du blé, certaines étant basées sur l'utilisation de lignées haploïdes doublées. Des marqueurs moléculaires et des QTL ont été cartographiés pour un grand nombre de caractères (résistance au piétin-verse, résistance au virus de la jaunisse nanisante de l'orge, certains gènes de résistance aux rouilles et à l'oïdium, de nanisme, de qualité en panification et de composition de l'amidon *waxy*...).

La sélection assistée par marqueurs est utilisée pour cumuler des gènes de résistance et pour introduire des allèles des sous-unités des gluténines favorables à la qualité.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection généalogique ('Shango', 'Étoile de Choisy'). Sélection généalogique différée (méthode <i>bulk</i>), puis sélection généalogique ('Soissons'). Haplométhode ('Florin', 'Raspail', 'Napier'). Sélection massale, puis généalogique ('Renan', 'Rumba').
Types variétaux	Variété lignée pure. La très grande majorité des variétés de blé sont des lignées pures. Variété hybride F₁. Cette structure permet l'exploitation de l'hétérosis et donne la possibilité d'additionner des caractères (résistances aux maladies, qualité boulangère,...) ('Sextant', 'Domino', 'Mercury', 'Fronty',...).

Perspectives d'amélioration

Les orientations de la recherche en amélioration variétale du blé tendre sont dictées par les priorités accordées aux aspects d'économie d'intrants, de respect de l'environnement et de satisfaction des besoins des utilisateurs. Dans ce contexte, la sélection pour la résistance aux maladies est un thème majeur qui permettra à terme de réduire sensiblement le recours aux fongicides. De façon complémentaire, la recherche de génotypes valorisant mieux l'azote est devenu un thème important. Enfin, le sélectionneur prend en compte des critères de qualité de plus en plus précis définis par les divers utilisateurs du blé. À côté des critères de qualité technologique et nutritionnelle, les questions d'hygiène alimentaire et de sécurité sanitaire sont l'objet de réflexions et de travaux de recherche importants.

Caractères à améliorer

Rendement. L'augmentation du rendement et de sa stabilité reste un critère important dans la sélection des variétés. Jusqu'à la fin des années 1990, aucun ralentissement n'a été observé dans le progrès réalisé pour le rendement. L'extension de l'utilisation de variétés hybrides pourrait permettre de faire des progrès pour ce caractère (*cf.* encadré ci-dessous).

Résistance aux maladies. Des gènes conférant des résistances aux maladies ont été introduits dans le blé. Malheureusement, un certain nombre d'entre eux et en particulier ceux impliqués dans des phénomènes de résistance de type gène à gène, ont été contournés. Il serait certainement intéressant de mettre au point des stratégies génétiques et culturales afin de mieux gérer les résistances. L'utilisation de résistances quantitatives et le cumul de résistances simples peuvent constituer des solutions. Une autre approche consisterait en une meilleure gestion dans

Le blé hybride

La création de variétés hybrides est tentée de manière récurrente par un certain nombre d'établissements semenciers. Jusqu'à présent, il semble difficile de faire des profits avec les variétés hybrides du fait du coût élevé de la production de semences : environ 60 euros/ha de plus que pour une variété lignée. La principale cause de ce surcoût vient de la difficulté de maîtrise de la fécondation croisée qui repose actuellement sur l'utilisation de gamétocides. Il n'est pas exclu que, dans le futur, un système de contrôle de la fécondation croisée, obtenu par transgénèse, similaire à celui appliqué avec succès par les Canadiens sur le colza, puisse être utilisé pour la production de semences de variétés hybrides de blé.

L'hétérosis n'est pas spectaculaire. En effet, on constate un gain maximal en rendement de seulement 10 à 15 %, dû à un poids de mille grains et un nombre de grains par épi plus élevés. Cependant, les variétés de blé de type hybride F_1 sont plus vigoureuses et plus rustiques que les variétés de type lignée pure, ce qui apporte une meilleure stabilité des performances. Cette structure variétale présente aussi l'avantage de permettre le cumul rapide des gènes dominants.

l'espace et dans le temps des gènes de résistance avec une culture en mélange dans un même champ de plusieurs variétés possédant des gènes de résistance différents. Cependant, il reste à démontrer l'intérêt de cette stratégie innovante de gestion des gènes de résistance et des modes de production qu'elle suppose, ces derniers allant à l'encontre du schéma de production « monovariétale lignée pure » fortement ancré dans la pratique de la céréaliculture française.

Respect de l'environnement. Des projets visant à sélectionner des variétés de blé valorisant mieux l'azote sont en cours. Ils consistent à comparer les lignées en conduite intensive et avec réduction des intrants. La collaboration avec les agronomes a permis de mettre au point des itinéraires techniques pertinents pour l'évaluation des lignées.

Qualité d'utilisation du grain. Les problèmes recensés sur la qualité de la production française de blé tendre concernent essentiellement :

- l'amélioration de la valeur meunière,
- la poursuite de l'augmentation de la « force » des pâtes,
- l'amélioration de la stabilité de la qualité des lots produits,
- la résistance à la germination sur pied,
- le maintien ou l'augmentation de la teneur en protéines dans le contexte d'une pratique d'agriculture « intégrée »,
- la diversification de la qualité des produits pour des usages variés, recherche de variétés plus spécifiques pour les industries agroalimentaires.

L'amélioration variétale, dotée de nouveaux outils de connaissance et de maîtrise de l'information génétique est en mesure d'apporter des réponses à ces questions :

Amélioration de la valeur meunière. La valeur meunière peut être définie comme l'aptitude d'un blé à donner plus ou moins de farine d'une pureté déterminée (taux d'extraction) et d'une qualité définie. La valeur meunière revêt donc un aspect pondéral ou quantitatif (le rendement meunier), un aspect dynamique (le comportement en mouture) et un aspect qualitatif (la qualité de la farine extraite). La recherche sur la génétique de la valeur meunière a pour objectifs la définition de critères et la mise au point d'outils pour la sélection du blé. Pour cela, on se propose de comprendre, définir et mesurer la valeur meunière du blé tendre, puis de préciser les critères de qualité des farines : granulométrie et valeur d'utilisation tant pour les propriétés rhéologiques dans les industries de cuisson que pour les qualités nutritionnelle, organoleptique et diététique (micronutriments). Des études sont conduites sur les bases biochimiques et histologiques de la qualité meunière pour mieux comprendre l'élaboration de la qualité meunière au cours de la formation du grain par la connaissance des relations entre caractères physiques, histologiques et biochimiques du grain et de la farine.

Maintien ou augmentation de la teneur en protéines dans le contexte d'une pratique d'agriculture « intégrée ». On a mis en évidence une relation négative entre le

rendement en grain et la teneur en protéines. L'analyse du développement du potentiel de rendement sur la période récente révèle un changement de la composition du grain : un accroissement du rendement conduit à une diminution du rapport « protéines/amidon » et, dans le cas du blé, un accroissement du rendement en grain d'environ 2 tonnes par hectare aurait conduit à une diminution de la concentration protéique de 20 mg par gramme de matière sèche. Bien que la relation « rendement en grain – teneur en protéines » soit souvent masquée par les effets du milieu, la relation négative entre rendement et teneur en protéines peut poser d'importants problèmes en sélection, si on veut continuer à accroître la productivité sans perdre en teneur en protéines. En conséquence, une première solution consiste à poursuivre des programmes de sélection sur la productivité, tout en mettant en œuvre des pratiques culturales permettant de compenser la baisse de teneur en protéines concomitante. La fertilisation azotée avec apport tardif en est un exemple. Une autre solution est de repérer des génotypes qui se distingueraient de manière favorable de la relation négative générale entre rendement et teneur en protéines. Par ailleurs, la recherche de gènes-clés impliqués dans le métabolisme de l'azote de la plante et dans l'efficacité des remobilisations vers le grain est en cours.

À noter que l'introduction des éco-taxes sur les rejets d'azote conduira probablement à moduler la teneur en azote dans les régions d'élevage intensif où les surfaces d'épandage sont limitées. Les variétés ayant une faible teneur en protéines pourraient avoir un avantage économique, car les protéines de céréales (blé notamment), déséquilibrées en acides aminés, conduisent à davantage de rejets azotés par les animaux que les protéines de Légumineuses (soja *Glycine max* (L.) Merrill en particulier). Il serait donc intéressant de réaliser pour ces régions des variétés à relativement faible teneur en protéines enrichies en acides aminés essentiels.

Qualité en panification. La qualité de la farine en panification et dans les autres industries de cuisson se définit en fonction de son usage. S'agissant de l'alimentation humaine et de la consommation de produits de cuisson, la qualité se décline en qualité technologique ou qualité rhéologique et en qualité nutritionnelle (diététique) et hygiénique. Si on ne considère que le processus de fabrication du pain, la valeur boulangère dépend du rendement en pâte, c'est-à-dire la quantité d'eau que peut absorber la farine pour une consistance donnée, de la tolérance au pétrissage sans relâcher ni coller excessivement, tout en étant extensible et élastique, de la « machinabilité » de la pâte, c'est-à-dire son aptitude à être travaillée à la main ou à la machine aux différentes étapes de la panification et de la cuisson, de l'activité de fermentation, du développement de la pâte et du pain, et de la qualité organoleptique de la mie et du pain. Pour mesurer la qualité de la farine, on a recours aux tests rhéologiques « traditionnels » tels que l'alvéographe Chopin et le test de panification dont les résultats dépendent principalement de la composition protéique qualitative et quantitative (cf. encadré p. 154) et à un degré moindre de la composition glucidique et lipidique.

Le rôle des protéines de réserve du grain dans les propriétés rhéologiques de la pâte

Les propriétés rhéologiques de la pâte sont fortement influencées par les protéines de réserve de l'albumen, gliadines et gluténines. Les gluténines sont des polymères dans lesquels 2 types de sous-unités sont associées en réseau par des ponts disulfures. Les sous-unités gluténines de Haut poids moléculaire (s.u. Glu-HPM) sont l'un des éléments du gluten, c'est-à-dire le réseau protéique qui se forme dans une pâte de farine et d'eau. Les propriétés viscoélastiques du gluten expliquent les propriétés rhéologiques d'une pâte et son aptitude plus ou moins grande selon le type de fabrication envisagé : ainsi la fabrication de biscuits secs demande une pâte très extensible, tandis que celle de pain de mie exige au contraire une pâte très tenace. Les qualités globales en panification (volume, alvéolage de la mie...) dépendent en partie des propriétés rhéologiques de la pâte. L'étude de l'influence de la composition qualitative et quantitative des protéines de réserve de l'albumen, des sous-unités gluténines de haut poids moléculaire, en particulier sur les propriétés rhéologiques de la pâte permet de mieux en comprendre les déterminants génétiques et facilite la sélection de variétés mieux adaptées aux exigences des transformateurs.

D'un point de vue rhéologique, le rôle des gluténines de haut poids moléculaire dans la détermination de la force du gluten a été beaucoup étudié. Certains auteurs, comme Payne en 1987, vont jusqu'à proposer un classement des sous-unités gluténines en fonction de leur influence sur la qualité boulangère. Plus récemment, on a mis en évidence l'influence des sous-unités gluténines de faible poids moléculaire. Ceci est intervenu dans un contexte où il apparaissait que la variation des sous-unités gluténines de haut poids moléculaire ne suffisait pas à elle seule à expliquer les différences variétales de qualité boulangère. On a finalement abouti à la conclusion que la variation de la qualité boulangère peut être au mieux expliquée par des effets d'additivité et d'interaction des sous-unités gluténines de haut et de faible poids moléculaire. Le rôle des sous-unités gluténines dans la force d'une pâte est expliqué par leur capacité à former des polymères par le biais de liaisons disulfures intermoléculaires. La force de la pâte est donc essentiellement déterminée par la distribution des tailles relatives des polymères : ceux de plus grande taille, qu'on appelle les macropolymères, améliorent la force.

Valeur alimentaire du blé pour les volailles. La viscosité dépend de la composition du grain en arabinoxylanes (polysaccharides non amylacés) ; c'est un critère important pour l'alimentation du poulet en croissance, il est maintenant pris en compte dans les programmes de sélection. Deux types de mesure de la viscosité ont été définis :

- la viscosité utile réelle (VUR) : on laisse agir les xylanases avant la mesure ;
- la viscosité utile potentielle (VUP) : on détruit les xylanases par un traitement éthanolique à chaud avant la mesure.

Stabilité d'expression de la qualité. Les industriels de la filière blé recherchent des lots de qualité stable dans l'espace et dans le temps. La stabilité de la qualité est insuffisamment prise en compte par la sélection. Comment la mesurer ? Est-ce un caractère génétiquement déterminé ? Des recherches sont engagées pour tenter de répondre à ces questions.

Diététique, hygiène alimentaire et sécurité sanitaire. Le grain de blé contient en moyenne 70 % d'amidon, 12 % de protéines, 9 % de pentosanes et cellulose,

des sucres libres, des lipides et des matières minérales à des taux toujours inférieurs à 5 %. Le blé est donc, avant tout, un aliment énergétique. Néanmoins, les questions de diététique, d'hygiène alimentaire et de sécurité sanitaire pour l'homme et l'animal deviennent des sujets majeurs et sont de mieux en mieux prises en compte par la recherche :

■ QUALITÉ DIÉTÉTIQUE OU DENSITÉ NUTRITIONNELLE DU BLÉ

Elle repose sur la composition en minéraux et micro-nutriments. Ainsi, on s'intéresse à la teneur en vitamines (groupes E et B en particulier), en minéraux (Mg), à la teneur en fibres solubles et en constituants anti-oxydants (substances phénoliques, caroténoïdes...).

■ HYGIÈNE ALIMENTAIRE ET SÉCURITÉ SANITAIRE

Les allergies. Le gluten, présent dans le blé et nécessaire à la fabrication du pain, est responsable d'allergies graves. Il est, pour cette raison, interdit dans les aliments pour bébé. Par ailleurs, le nombre d'allergies au blé et à ses composants augmente. Elles représentent 3 % des allergies alimentaires et 20 % des allergies professionnelles (asthme du boulanger,...). La sélection de variétés avec une moindre allergénicité pourrait être entreprise.

La maladie cœliaque. Cette maladie n'est pas une allergie, mais une intolérance à certains composants du gluten. En effet, il n'y a pas alors de production d'immunoglobulines E et les individus sensibles ne peuvent pas être désensibilisés. Cette maladie peut être mortelle pour le bébé.

Les mycotoxines. La fusariose de l'épi provoquée par *Fusarium* sp. est une des maladies du blé dont on connaît mal le déterminisme génétique de la résistance. Quelques génotypes de blé tendre ont un niveau élevé de résistance à la fusariose. La difficulté de la sélection pour la résistance est aggravée par la méconnaissance de la synthèse des fusariotoxines. Certaines mycotoxines, surtout des trichothécènes, la plus fréquente étant le déoxynivalénol (DON) et ses dérivés, peuvent être détectées chez le blé. C'est, jusqu'à présent, la seule mycotoxine fusarienne des céréales à paille pour laquelle une norme a été définie au niveau de l'Union européenne. À partir du 1^{er} juillet 2006, les grains vendus à la première transformation ne devront pas en contenir plus de 1 250 mg par tonne. Des QTL de résistance à la fusariose stables ont été mis en évidence par plusieurs équipes dans le monde. À présent, on recherche les gènes impliqués dans les mécanismes de résistance et on étudie les liens entre la présence de gènes de résistance/sensibilité à la fusariose et la production de toxines.

L'ergot des céréales. Actuellement les collecteurs de blé constatent une recrudescence de l'ergot des céréales. Celui-ci, causé par *Claviceps purpurea*, se trouve à l'état de morceaux d'ergot fragmentés par la moissonneuse-batteuse, donc difficiles à trier. Le *Home Grown Cereal Authority* (HGCA, Royaume-Uni) a publié un avertissement à ce sujet en 2003. Il pourrait s'agir d'un effet de la réduction des intrants avec un moins bon contrôle des graminées adventices, puisque l'ergot a besoin de ce relais pour contaminer les épis de blé. Rappelons que

l'ergot des céréales porte le nom de l'organe de conservation, un sclérote, qu'il produit. Ce sclérote est une excroissance noire allongée, dépassant les glumes, qui peut atteindre jusqu'à 2 cm de long. Les ergots contiennent des alcaloïdes et peuvent entraîner des toxicoses (gangrènes sèches notamment) chez les animaux qui pâturent des graminées ou consomment des grains contaminés. Chez l'homme, la consommation de pain fabriqué à partir de grains contaminés peut également provoquer l'ergotisme, affection marquée par des troubles circulatoires et psychiques graves.

Prise en compte des cahiers des charges des marchés d'exportation. Le taux de protéines dans le grain est un critère essentiel pour les marchés à l'exportation. La sélection de variétés plus riches en protéines se heurte à la liaison inverse rendement/teneur en protéines déjà évoquée précédemment. Le poids spécifique (PS) est également un caractère important pour l'exportation.

Techniques à développer

La sélection de nouvelles variétés est facilitée par la connaissance de la génétique des caractères de valeur d'utilisation. La sélection variétale du blé tendre pour la qualité boulangère en France s'est appuyée de longue date sur des tests technologiques bien connus : la teneur en protéines, l'indice de sédimentation de Zeleny, le test de Pelschenke, le test de l'alvéographe Chopin, l'essai de panification CNERNA (Centre national d'études et de recherches sur la nutrition et l'alimentation) ou le test normalisé NF V03-716. Pour la teneur en protéines et la dureté, les méthodes indirectes de mesure par réflectance dans le proche infrarouge se sont à présent substituées aux méthodes directes.

Les schémas de sélection pour l'amélioration de la qualité d'utilisation évoluent progressivement avec l'apparition de nouvelles méthodes issues de la génétique moléculaire et des biotechnologies. Le postulat de départ est que la qualité d'utilisation du blé tendre dépend de la composition biochimique du grain. Cette composition est génétiquement déterminée, les conditions agro-climatiques influent sur la composition, donc sur la qualité en modifiant l'expression des gènes. La génomique propose des méthodes de connaissance des gènes et de compréhension de leur fonctionnement, les biotechnologies sont un ensemble d'outils permettant de modifier l'information génétique et son expression.

On peut donc attendre de la génomique et des biotechnologies, à la fois une meilleure connaissance des gènes et de leur fonctionnement, et une meilleure compréhension de leur influence sur la composition des grains et par voie de conséquence sur la qualité du grain (*cf.* encadré ci-contre). Ainsi, dans un contexte de progrès à la fois des connaissances sur les bases biochimiques de la qualité d'utilisation du grain et des farines, et des connaissances sur le déterminisme génétique des caractères (ces deux domaines échangeant et s'enrichissant l'un l'autre), le sélectionneur peut envisager le recours à de nouvelles méthodes d'amélioration variétale. Dans un premier temps, la démarche consistera à

La génomique d'expression : le transcriptome

Le but de la démarche du « transcriptome » est d'identifier précisément le ou les gènes exprimés dans un tissu ou un organe dans des conditions de milieu particulières. Le principe est que différents gènes sont exprimés dans différentes cellules ou tissus au travers d'un ARN messager (ARNm). Cet ARN messager transcrit dans la cellule est le reflet direct du gène exprimé. Des techniques permettent de resynthétiser le gène (ADNc) qui s'est exprimé dans la cellule et de l'étiqueter (techniques des étiquettes de séquences exprimées, *Expressed Sequence Tags*, EST). On pose l'hypothèse que les gènes qui s'expriment dans l'albumen de grain de blé en développement sont, pour une partie d'entre eux, les gènes déterminant la qualité d'utilisation. Certains d'entre eux sont donc susceptibles, par la variation de leur expression d'expliquer la variation de la qualité d'utilisation du grain. Dans le grain de blé en développement, l'activité métabolique principale est la synthèse des glucides et des protéines de réserve. Certains des gènes impliqués dans cette activité métabolique sont les « gènes candidats » de la qualité d'utilisation du grain de blé. Des méthodes de marquage, de cartographie fine, de recherche de colocalisation avec des QTL de la qualité, de séquençage de l'ADN, de clonage, puis de transgénèse permettront d'en préciser le rôle exact et de conforter l'hypothèse de l'implication de ces gènes dans l'expression des caractères de qualité. De nombreuses banques d'ADNc du grain de blé ont pu être constituées et font l'objet actuellement de telles recherches pour mettre en évidence des gènes de la qualité.

rendre plus efficaces les méthodes de sélection variétale « traditionnelles » et, dans un second temps, à mettre au point, si cela est justifié, de nouvelles méthodes de modification de l'information génétique de la plante.

Inscription et protection des variétés en France

1933, ouverture du catalogue blé tendre (en même temps que ceux du blé dur et du blé poulard).

1964, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste spéciale blé, orge, avoine et riz.

1976, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique spéciale blé tendre non panifiable.

En 2003, 215 variétés de blé tendre étaient inscrites sur la liste A du catalogue officiel français et 1 222 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 26 caractères morphologiques et physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. À l'issue de ces 2 ans, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Les 4 variétés les plus multipliées constituent les témoins de référence pour le rendement. Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le CTPS a contribué à orienter la sélection du blé en faisant varier les critères d'inscription et en établissant des systèmes de bonification :

1984, première incitation réglementaire à la sélection de variétés tolérantes aux parasites avec la mise en place d'un système de bonus/malus dans la cotation pour l'inscription ;

1985, expérimentation officielle des nouvelles variétés en conditions traitées ou non par des fongicides ;

1988, deuxième incitation réglementaire à la sélection de variétés tolérantes aux parasites et extériorisant leur potentiel de rendement avec un minimum d'intrants (bonification des variétés ayant des faibles écarts de rendement en conditions traitées ou non traitées par des fongicides) ;

1991, mise en place d'une collaboration entre le CTPS, l'Association nationale de la meunerie française (ANMF) et l'Institut technique des céréales et fourrages (ITCF, devenu récemment ARVALIS-Institut du végétal) pour l'élaboration de la « liste recommandée Meunerie Française » ;

1993, redéfinition et harmonisation de la classification technologique des variétés de blé tendre ;

2001, réévaluation des critères d'inscription afin de mieux répondre aux besoins des filières d'utilisation du blé tendre.

Pour en savoir plus

Ahmad M., 2000. Molecular marker-assisted selection of HMW glutenin alleles related to wheat bread quality by PCR-generated DNA markers. *Theor. Appl. Genet.*, 101 (5/6), 892-896.

Auriau P., Doussinault G., Jahier J., Lecomte C., Pierre J., Pluchard P., Rousset M., Saur L. et Trottet M., 1992. Le blé tendre. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A.Gallais et H.Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 22-38.

Autrique E., Singh R.P., Tanksley S.D. et Sorrells M.E., 1995. Molecular markers for four leaf rust resistance genes introgressed into wheat from wild relatives. *Genome*, 38 (1), 75-83.

Balfourier F., 2005. Impact de la sélection sur la diversité des blés tendres français et conséquences sur la gestion des collections. *Sél. Fr.*, 55, 23-32.

Bonjean A. et Picard E., 1990. *Les céréales à pailles. Origine – Histoire – Économie – Sélection*. Éditions Agriword, Softword, Verneuil-L'Étang, 208 p.

Bonjean A.P. et Angus W.J., 2000. *The world wheat book. A history of wheat breeding*. Éditions Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 1120 p.

- Boyardieu J.**, 1980. *Les cultures céréalières. Nouvelles encyclopédies des connaissances agricoles*. Éditions Hachette, Paris, 255 p.
- Branlard G., Dardevet M., Saccomano R., Lagoutte F. et Gourdon J.**, 2001. Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality. *Euphytica*, 119, 59-67.
- Brettell R.I.S., Banks P.M., Cauderon Y., Chen X., Cheng Z.M., Larkin P.J. et Waterhouse P.M.**, 1988. A single wheatgrass chromosome reduces the concentration of barley yellow dwarf virus in wheat. *Ann. Appl. Biol.*, 113, 599-603.
- Bryant J.**, 1992. Transgenic wheat plants : the end of the beginning. *Trends Biotechnol.*, 10 (10), 342-343.
- de Bustos A., Rubio P., Soler C., Garcia P. et Jouve N.**, 2001. Marker assisted selection to improve HMW-glutenins in wheat. *Euphytica*, 119 (1/2), 69-73.
- de Buyser J., Henry Y. et Taleb G.**, 1985. Wheat androgenesis : cytogenetical analysis and agronomic performance of doubled haploids. *Z. Pflanzenzucht.*, 95, 23-34.
- Cadalen T., Sourdille P., Charmet G., Tixier M.H., Gay G., Boeuf C., Bernard S., Leroy P. et Bernard M.**, 1998. Molecular markers linked to genes affecting plant height in wheat using doubled-haploid population. *Theor. Appl. Genet.*, 96 (6/7), 933-940.
- Cauderon Y.**, 1988. Hybridation entre blés et *Agropyron* : bases cytogénétiques de l'évaluation des *Agropyron* et des transferts de gènes aux blés. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (8), 79-90.
- Cauderon Y.**, 1994. Cytogénétique et amélioration des plantes, l'exemple des hybrides entre les genres *Triticum* et *Elytrigia* (ex *Agropyron*). *C. R. Soc. Biol.*, 188, 93-107.
- Cauderon Y.**, 1998. Introgression dans le génome du blé de fragments de chromosomes d'espèces étrangères responsables de résistances à certaines maladies. *Colloque Biodiversité*, Fondation Xavier Bernard, 28 novembre 1998, Poitiers, 37-49.
- Cauderon Y., Tempé J. et Gay G.**, 1978. Création et analyse cytogénétique d'un nouvel hybride : *Hordeum vulgare* ssp. *distichon* × *Triticum timopheevi*. *C. R. Acad. Sci. Paris*, série D, 286, 1687-1690.
- Cook J., Johnson V.A. et Allan R.E.**, 1993. Le blé. Dans : *Méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE éditions, Paris, 27-38.
- Dosba F. et Doussinault G.**, 1981. Les lignées d'addition blé-*Aegilops ventricosa*. I. Étude du comportement vis-à-vis du piétin-verse des différentes lignées obtenues. *Agronomie*, 1 (6), 503-511.
- Doussinault G.**, 1995. Cent ans de sélection du blé en France et en Belgique. Dans : *Quel avenir pour l'amélioration des plantes ?* Ed. AUPELF-UREF/John Libbey Eurotext, Paris, 3-8.
- Doussinault G., Delibes A., Sanchez-Monge R. et Garcia-Olmedo F.**, 1983. Transfer of a dominant gene for resistance to eyespot disease from a wild grass to hexaploid wheat. *Nature*, 303, 698-700.
- Doussinault G., Dosba F. et Jahier J.**, 1983. New results on the improvement of the level of resistance to eyespot in wheat. *Proc. 6th Int. Wheat Genet. Symp.*, Kyoto, Japon, 193-198.
- Doussinault G., Kaan F., Lecomte C. et Monneveux P.**, 1992. Les céréales à pailles : présentation générale. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 13-21.
- Dubois M.**, 2002. L'évolution des variétés de blés selon le point de vue de l'utilisateur (de la meunerie aux pains, viennoiseries, pâtisserie,...). *Sél. Fr.*, 53, 83-86.
- Feillet P.**, 2000. *Le grain de blé : composition et utilisation*. INRA Éditions, Paris, 308 p.
- Finckh M.R., Gacek E.S., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C.C., Munk L., Nadziak J., Newton A.C., de Vallavieille-Pope C. et Wolfe M.S.**, 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, 20, 813-837.
- Friebe R., Mukai Y., Gill B.S. et Cauderon Y.**, 1992. C-banding and in situ hybridization analyses of *Agropyron intermedium*, a partial wheat × *Ag. intermedium* amphiploid, and six derived chromosome addition lines. *Theor. Appl. Genet.*, 84, 899-905.

- Grignac P., Poux J. et Tomas A.**, 1981. Comparaison de variétés anciennes et modernes de blé tendre à divers niveaux d'intensification dans un environnement méditerranéen. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 67 (17), 1434-1453.
- Huang J., Rozelle S., Pray C. et Wang Q.**, 2002. Plant biotechnology in China. *Science*, 295 (5555), 674-677.
- Igrejas G., Martinant J.P., Bouguennec A., Villain A.C., Saulnier L., Popineau Y. et Branlard G.**, 2002. Genetical, biochemical and technological parameters associated with biscuit quality. I. Prediction using grain hardness and water extractable arabinoxylans. *J. Cereal Sci.*, 36, 115-124.
- Jahier J., Doussinault G., Dosba F. et Bourgeois F.**, 1978. Monosomic analysis of resistance to eyespot in the variety 'Roazon'. *Proc. 5th Int. Wheat Genet. Symp.*, New Delhi, 437-440.
- Jahier J., Tanguy A. M. et Doussinault G.**, 1989. Analysis of the level of eyespot resistance due to genes transferred to wheat from *Aegilops ventricosa*. *Euphytica*, 44, 55-59.
- Jonard P.**, 1951. *Les blés tendres (Triticum vulgare Vill.) cultivés en France*. INRA Éditions, Paris, 491 p.
- Le Buanec B.**, 1999. Diversité génétique des variétés de blé tendre cultivées en France au cours du XX^e siècle. Évolution variétale, données techniques et économiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (8), 37-59.
- Liu J., Liu D., Tao W., Li W., Wang S., Chen P., Cheng S. et Gao D.**, 2000. Molecular marker-facilitated pyramiding of different genes for powdery mildew resistance in wheat. *Plant Breed.*, 119 (1), 21-24.
- Luciani A.**, 2004. Le blé tendre. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 93-113.
- Maïa N.**, 1967. Obtention de blés tendres résistants au piétin-verse (*Cercospora herpotrichoides*) par croisements interspécifiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 53 (2), 149-154.
- Medvedev J.**, 1971. *Grandeur et chute de Lyssenko*. Gallimard, Paris, 317 p.
- Oury F.-X., Chiron H., Pichon M., Giraud A., Bérard P., Faye A., Brancourt-Hulmel M. et Rousset M.**, 1999. Reliability of indirect selection in determining the quality of bread wheat for French bread-baking. *Agronomie*, 19, 621-634.
- Patnaik D. et Khurana P.**, 2001. Wheat biotechnology : a minireview. *EJB*, 4(2), 1-24.
- Payne P.I.**, 1987. Genetics of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on bread-making quality. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 38, 141-153.
- Peng J., Richards D.E., Hartley N.M., Murphy G.P., Devos K.M., Flintham J.E., Beales J., Fish L.J., Worland A.J. et Pelica F.**, 1999. « Green revolution » genes encode mutant gibberellin response modulators. *Nature*, 400 (6741), 256-261.
- Perretant M.R., Cadalen T., Charmet G., Sourdille P., Nicolas P., Bœuf C., Tixier M.H., Branlard G., Bernard S. et Bernard M.**, 2000. QTL analysis of bread-making quality in wheat using a doubled-haploid population. *Theor. Appl. Genet.*, 100 (8), 1167-1175.
- Picard E.**, 1984. *Contribution à l'étude de l'hérédité et de l'utilisation en sélection de l'haplodiploïdisation par androgénèse in vitro chez une céréale autogame : Triticum aestivum L.* Thèse de Doctorat d'État, université Paris XI, Orsay, France, 269 p.
- Rapilly R., Auriau P., Laborie Y. et Depatureaux C.**, 1984. Recherches sur la résistance partielle du blé tendre à *Septoria nodorum* Berk. *Agronomie*, 4, 639-651.
- Roussel P. et Chiron H.**, 2002. *Les pains français, évolution, qualité, production*. Maé-Erti éditions, Vesoul, 433 p.
- Rousset M.**, 2000. Les nouvelles approches de la génétique des caractères de qualité d'utilisation du blé tendre. Perspectives pour la création variétale. *Industrie des céréales*, 118, 15-19.
- Rousset M., Brabant P., Kota R. S., Dubcovsky J. et Dvorak J.**, 2001. Use of recombinant substitution lines for gene mapping and QTL analysis of bread making quality in wheat.

- Proceedings of the 6th International Wheat Conference*, Budapest 4-9th June 2000. *Euphytica*, 119, 81-87.
- Rousset M.**, 2002. La sélection variétale du blé tendre et les aspects qualitatifs. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 88 (7), 21-33.
- Sears S.E.**, 1976. Genetic control of chromosome pairing in wheat. *Ann. Rev. Genet.*, 10, 31-51.
- Sharma H.C. et Gill B.S.**, 1983. Current status of wide hybridization in wheat. *Euphytica*, 32, 17-31.
- Sharp G.L., Martin J.M., Lanning S.P., Blake N.K., Brey C.W., Sivamani E., Qu R. et Talbert L.E.**, 2002. Field evaluation of transgenic and classical sources of wheat streak mosaic virus resistance. *Crop Sci.*, 42 (1), 105-110.
- Simon M.**, 1999. Les variétés de blé tendre cultivées au cours du XX^e siècle et leurs origines génétiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (8), 5-26.
- Thomas G. et Thomas M.**, 1988. Histoire du blé et de son rendement. II. Treize millénaires de culture de blé. *Sci. Agron. Rennes*, 10 p.
- Triboï E. et Triboï-Blondel A.-M.**, 2002. Productivity and grain or seed composition : a new approach to an old problem-invited paper. *Eur. J. Agron.*, 16, 163-186.
- Trottet M. et Doussinault G.**, 2002. Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XX^e siècle. *Sél. Fr.*, 53, 3-18.
- de Vilmorin H.**, 1880. Essais de croisement entre blés différents. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 27, 356-361.
- Vincent A., Ponchet J. et Koller J.**, 1952. Recherche de variétés de blé tendre peu sensibles au piétin-verse. *Ann. Amélior. Plant.*, 2, 459-472.

Les caféiers¹

Arabica, *Coffea arabica* L. ($2n = 4x = 44$)

Robusta, *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner ($2n = 2x = 22$)
(Rubiacées)

Présentation des espèces cultivées

Le caféier d'Arabie, *Coffea arabica* L. est une espèce allotétraploïde originaire du sud-ouest de l'Éthiopie. Des analyses moléculaires d'ADN nucléaire et mitochondrial ont permis de consolider l'hypothèse qu'un des parents était une espèce sauvage apparentée à *C. eugenoides* S. Moore et que l'autre était proche du caféier robuste, *C. canephora* Pierre ex A. Froehner. L'amphidiploïde *C. arabica* est probablement originaire de l'Éthiopie.

L'espèce *C. arabica* a été transférée au Yémen qui est devenu un véritable centre de dissémination secondaire. Le caféier arabica introduit de la côte de Malabar (Inde) à Java (Indonésie) en 1696 correspond à la variété 'Typica'. Après avoir transité par les Pays-Bas, puis par Paris, il a été implanté, au début du XVIII^e siècle, aux Antilles et aux Amériques. Un peu plus tard, une autre source de caféier du Yémen, a été introduite à l'île de La Réunion, puis aux Amériques où elle a été appelée 'Bourbon'.

Ce n'est qu'au XVII^e siècle que le café produit au Yémen a commencé à être utilisé comme boisson en Europe. La France a ensuite implanté des caféiers dans ses colonies au XVIII^e siècle afin d'assurer son approvisionnement.

Il faut signaler deux autres espèces *Coffea liberica* W. Bull ex Hiern et *C. excelsa* W. Bull ex Hiern qui, bien qu'elles aient disparu progressivement, ont été cultivées et leur fruit consommé, entre autres, en Asie.

¹ *arabica* (en italiques et avec une minuscule) est un nom latin d'espèce, mais Arabica (avec une majuscule) est le nom du café produit, et le nom usuel des caféiers de l'espèce ; Robusta est, à l'origine, un nom de variété (donc avec une majuscule). Il désigne communément, par extension, tous les caféiers de l'espèce *C. canephora* et les cafés produits.

Jusqu'au début du XX^e siècle, seul le café Arabica était effectivement consommé. *C. canephora* n'a vraiment été cultivé qu'à partir du XX^e siècle, pour remplacer dans certains lieux (notamment Ceylan et Java) *C. arabica*, espèce trop sensible à des maladies fongiques comme la rouille orangée, et pour étendre la culture du caféier aux pays tropicaux à climat chaud et humide dans lesquels l'arabica-culture est impossible. Le type « Robusta » de l'espèce diploïde *C. canephora* a donné son nom au café produit et aux caféiers de cette espèce.

La culture du caféier a connu un extraordinaire succès, puisque la production de café a quintuplé au cours du XX^e siècle : elle est passée d'une production insulaire et coloniale à une production continentale.

Les caféiers sont des plantes pérennes multipliées par semences ou par voie végétative. *C. canephora* est un caféier auto-incompatible, ce qui lui assure une parfaite allogamie. Par contre, *C. arabica* est une espèce autogame, avec un taux de fécondation croisée ne dépassant généralement pas 15 %. Les caféiers produisent un pollen abondant qui peut être transporté par le vent et les insectes, surtout dans les 100 premiers mètres et plus aléatoirement au-delà d'un kilomètre. Si les champs de caféiers ne sont pas assez isolés, les risques d'intercroisements sont donc importants. Les données sur les distances minimales d'isolement, pour la production de semences, sont de l'ordre d'une cinquantaine de mètres de forêt. En outre, il peut se produire des échanges entre les espèces sauvages et les caféiers cultivés.

Tous les croisements interspécifiques au sein du genre *Coffea* sont susceptibles de produire des hybrides, plus ou moins fertiles. Cependant, il faut noter que les caféiers sont souvent cultivés en dehors de leurs zones d'origine, dans des pays où il n'y a pas de caféier sauvage, comme l'Amérique. Par contre, le genre *Coffea* ne semble pas pouvoir être impliqué dans des croisements intergénériques. Les nombreuses tentatives de croisement avec d'autres Rubiacées se sont toutes soldées par un échec. Enfin, les caféiers ne sont pas envahissants, du fait que la graine de type récalcitrant et sans dormance a une durée de vie de quelques semaines à quelques mois. Dans les champs de caféier, les jeunes repousses issues de semences sont généralement éliminées par le désherbage.

Les caféiers sont cultivés dans tous les pays d'Amérique, d'Asie, d'Afrique situés dans la zone tropicale humide. La disparition d'un certain nombre de forêts, refuges des caféiers spontanés en Afrique et sur les îles proches dans l'océan Indien, a conduit à une perte de variabilité génétique. Cependant, les prospections des quarante dernières années ont permis de sauver en partie cette diversité. La diversité de *C. canephora* est probablement supérieure à celle de *C. arabica* du fait de son allogamie et de sa plus large répartition géographique. Actuellement, les ressources génétiques caféières naturelles, en collections ou cultivées, sont devenues très peu accessibles aux sélectionneurs des autres pays.

Les ressources génétiques des deux espèces cultivées ont été régulièrement prospectées au cours du XX^e siècle. Dès 1960, d'importantes collections de caféiers

spontanés africains avaient été constituées en Éthiopie, à Madagascar, en Côte-d'Ivoire, en Inde et en Amérique latine. En ce qui concerne *C. arabica*, des prospections ont eu lieu notamment en Éthiopie et au Yémen. La collection la plus importante se trouve à Jimma en Éthiopie, très partiellement dupliquée sous l'égide de la FAO, en Afrique (Lyamungu en Tanzanie, Man en Côte-d'Ivoire, Foubot/Santa au Cameroun et Ruiru au Kenya), en Amérique latine (Campinas au Brésil, Turrialba au Costa Rica) et en Asie (Chikmagalur en Inde).

Production et utilisation

Le produit récolté, la cerise du caféier, est un fruit charnu, une drupe à deux graines (les grains de café).

Un caféier en culture a une production annuelle moyenne de cerises de 2,5 kg. Elles fournissent 500 g de café vert qui seront transformés en 400 g de café torréfié (en conditions exceptionnelles, un caféier peut produire jusqu'à 20 kg de cerises).

La production mondiale de grains de café vert (café marchand) dépasse 7,7 millions de tonnes. Le premier producteur est le Brésil (2,5 millions de tonnes), suivi du Viêt-Nam (0,83 million de tonnes), l'Indonésie (0,70 million de tonnes), de la Colombie (0,66 million de tonnes), le Mexique (0,31 million de tonnes) et l'Inde (0,28 million de tonnes) (données FAO, 2004). En règle générale, les caféiers Arabica sont surtout cultivés en Amérique latine, tandis que l'Afrique (exception faite de l'Afrique de l'Est) et l'Asie cultivent en majorité des caféiers Robusta. Au niveau de la valeur des échanges commerciaux internationaux, le café occupe une place importante : il est en seconde position, derrière le pétrole. La production mondiale de café est constituée à 70 % de *C. arabica* et à 30 % de *C. canephora*.

Les « cerises », fruits du caféier, sont récoltées à maturité et traitées par voie humide (dépulpage, fermentation, lavage et séchage) ou par voie sèche (séchage du café coque) afin d'obtenir du café « parche » ou « coque », respectivement. Le café vert est obtenu par un décorticage qui permet d'éliminer enveloppes et résidus. Puis, les grains sont transportés dans les lieux d'utilisation, où ils sont torréfiés. La torréfaction consiste à placer les grains, pendant 5 à 25 minutes, à des températures comprises entre 185 °C et 240 °C. Cette opération provoque les nombreuses modifications chimiques et physiques du grain, à l'origine de l'arôme et du goût particulier du café. Ces grains peuvent ensuite subir différents traitements selon que l'on souhaite obtenir du café en grain, du café moulu ou du café soluble. Les cafés commercialisés sont, généralement, des mélanges de cafés de différentes origines, voire d'Arabica et de Robusta. La tendance actuelle est à augmenter la transformation industrielle dans les pays producteurs.

Histoire des variétés cultivées

C. arabica

Une grande confusion règne entre les types de café proposés sur le marché, le plus souvent caractérisés par l'espèce et le pays d'origine. La liste ci-dessous est donc loin d'être exhaustive.

Variétés anciennes

1714, '**Typica**', variété de type lignée qui a été à l'origine du développement de la culture du caféier en Amérique du Sud. Cette variété se caractérise par une bonne qualité à la tasse mais aussi par une productivité assez faible.

'**Moka**' (Éthiopie), ce café, traité par voie sèche, provient du territoire de Harrar, et doit son nom au port de Moka ou Mocha au Yémen, par lequel il transitait. Les variétés dénommées 'Harrar' ou 'Mocha', sont proches de 'Bourbon'. À Java, ce nom désigne un café à petit grain rond (caracoli ou *peaberry*) probablement dérivé du Moka éthiopien.

1870, '**Maragogipe**' (Brésil), variété découverte dans la région de Bahia (Brésil) se distinguant par une mutation lui conférant un accroissement de la taille du fruit. La qualité à la tasse du café obtenue avec cette variété est remarquable. Son principal défaut est une productivité assez faible.

1890, '**Bourbon**', variété de type lignée, ramifiée et à petit grain dont la productivité était bien supérieure à celle de 'Typica' et qui a connu un grand succès commercial.

1900, '**Laurina**' ou '**Bourbon Pointu**' (La Réunion), variété dérivée de 'Bourbon' par une mutation qui lui confère un port nain, un grain « pointu », et une faible teneur en caféine. Malgré la bonne qualité du café produit, cette variété n'est pas cultivée sur des grandes surfaces du fait de son faible rendement et de sa sensibilité à la rouille orangée.

1911, '**Kent**' (L.P. Kent, Mysore, Inde), première variété de *C. arabica* présentant une certaine résistance à la rouille orangée. La résistance présente dans cette variété a vite été contournée. Cette variété indienne, productive, est cultivée dans de nombreux pays.

XX^e siècle, '**Caturra**' (Brésil), variété issue d'une mutation « port nain » quasi dominante de 'Bourbon'. Elle est très productive à haute densité de plantation. Une mutation similaire mais non dominante chez 'Typica' donne la variété 'San Ramón', peu productive.

XX^e siècle, '**Mundo Novo**' (Brésil), variété issue d'un croisement spontané entre 'Bourbon' et 'Sumatra' ('Typica'), suivi d'une sélection généalogique. Sa productivité est supérieure à 2 t de café vert/ha. Cette production était entre 50 % et 150 % supérieure à celle des variétés traditionnelles de ce pays.

XX^e siècle, '**Blue Mountain**' (Jamaïque), variété, appellation locale de 'Typica', produisant en Jamaïque un café très réputé qui peut être vendu jusqu'à 150 €

le kg de café vert. En Afrique, cette variété se distingue par une résistance partielle à l'anthracnose des baies.

Variétés récentes

Début XX^e siècle, '**Bourbon Amarelo**' (IAC, Brésil), variété de 'Bourbon' à fruit jaune, améliorée pour sa productivité et sa qualité à la tasse.

Années 1940, '**SL28, SL34**' (CRF Riuru, Kenya), '**N39**' (Tanzanie), variétés issues de 'Bourbon', qui se distinguent par la qualité organoleptique exceptionnelle de leur café (acidité). Elles fournissent un café de qualité supérieure.

1950, '**Catuai**' (IAC, Brésil), type variétal, issu du croisement entre 'Mundo Novo' et 'Caturra' dont le nanisme favorise la culture à forte densité. Ce type variétal a permis d'accroître sensiblement la productivité à l'hectare, ce qui lui a valu un grand succès commercial. Elle constitue, avec 'Caturra', la majorité des plantations d'Amérique centrale.

Années 1950, '**Arusha**' (Pacifique Sud), variété, importée de Tanzanie, qui est liée à l'essor de la caféiculture, dans les montagnes de Papouasie-Nouvelle Guinée, en particulier. De type « Bourbon », elle est proche des sélections d'Afrique de l'Est.

Années 1950, '**Icatu**' (IAC, Brésil), variété issue de croisements interspécifiques avec *C. canephora* suivis de nombreux rétrocroisements avec *C. arabica*. Cette variété résistante à la rouille orangée, aux nématodes et à l'anthracnose des baies, est réputée pour une qualité à la tasse assez décevante.

Années 1950, '**Hybride de Timor**' (Centro d'Investigações das Ferrugens do Cafeeiro, Portugal), variété repérée par les Portugais sur l'île de Timor (Indonésie), issue de l'hybridation spontanée avec *C. canephora*. Cette variété est résistante à de nombreuses maladies, en particulier la rouille orangée et, dans certains cas, à l'anthracnose des baies (*Coffee berry disease*, CBD).

1959, '**Catimor**' (Portugal), variété issue du croisement entre 'Caturra' et 'Hybride de Timor'. Cette variété, améliorée par générations successives, se caractérise par de nombreuses résistances (à la rouille orangée, à l'anthracnose des baies et aux nématodes), sa vigueur végétative et sa productivité. Le choix de cette variété a longtemps été la seule parade au développement de la rouille orangée sur le continent américain. Par contre, la réussite commerciale et la qualité à la tasse de cette variété sont discutées.

1975, '**Colombia**' (Cenicafe, Colombie), variété de type composite, constituée d'un mélange de lignées proches, sélectionnées dans des générations successives de 'Catimor', par autofécondations et rétrocroisements. Cette variété a des caractéristiques similaires à celles de 'Catimor'. La production de semences est effectuée en champs semenciers.

1985, '**Ruiru 11**' (CRF Ruiru, Kenya), variété composite, issue de l'introgresion dans les variétés 'SL28' et 'SL 34' de gènes de résistance à l'anthracnose des

baies et à la rouille orangée présents dans les variétés 'K7', 'Rume Sudan', et 'Catimor'. Jusqu'à présent, cette variété n'a pas été réellement diffusée en raison de problèmes de production manuelle de semences hybrides (elle est produite principalement par pollinisation manuelle et par bouturage horticole).

2000, '**Hybrides F₁ Arabica**' (Pays membres de Promecafé – Amérique centrale, CATIE / CIRAD, France), variétés de type hybride F₁, issues d'hybridations entre variétés commerciales et génotypes spontanés d'Éthiopie. Ces hybrides clonés sont encore au stade de la sélection finale. Ils prendront des noms de variété quand ils seront distribués à grande échelle aux planteurs.

'**Peaberries**', type de café recherché pour la forme arrondie de ses fèves (grains « ronds » ou « caracolis »), provenant de cerises à une seule graine. Chez l'Arabica, la proportion de ce type de grains est inférieure à 10 %. Elle peut être plus élevée chez certains mutants, ou dans les hybrides intra- et interspécifiques.

C. *canephora*

Variétés anciennes

1901, '**Robusta**' (Zaïre), variété à l'origine de la culture de cette espèce. Elle a été introduite à Java où la rouille orangée causait de gros dégâts sur *C. arabica*. Cette variété s'est imposée du fait de sa vigueur, de sa productivité et, surtout, de sa tolérance à la rouille orangée.

1910, '**Congusta**' (Java, Indonésie), type variétal obtenu par hybridation interspécifique spontanée entre *C. canephora* var. *ugandae* (P.J.S. Gramer A. Chev.) et *C. congensis* A. Froehner. Il se distingue par sa fertilité, la qualité de son café et par son adaptation aux inondations qui lui ont permis de connaître le succès à Madagascar.

'**Kouillou**' (Gabon), variété cultivée à Madagascar. La déformation de son orthographe a donné le '**Conilon**', cultivé au Brésil.

'**Nganda**' (Ouganda), variété native, préférée au 'Robusta' par les planteurs ougandais, du fait de la souplesse de ses tiges.

Variétés récentes

1950, '**Robusta du Congo belge**' (Afrique de l'Ouest). Cette variété, se distinguant des premiers types « Robusta » par sa résistance à la trachéomycose, a permis de juguler l'épidémie des années 1950 en Afrique de l'Ouest.

1975, '**Hybrides Robusta**' (IFCC, Côte-d'Ivoire, Cameroun), variétés de type hybride de clones se distinguant par une productivité et une vigueur bien supérieures à celles des variétés populations traditionnellement cultivées dans ces pays. La production de semences est effectuée en champs semenciers tri-clonaux.

1975, '**Clones Robusta**' (IFCC, Côte-d'Ivoire, Cameroun, Togo, Madagascar, Ouganda), mélange de clones. Le gain en productivité est plus important pour les variétés clonales (clones élites) que pour les variétés hybrides de clones. La

multiplication est assurée par une production de boutures racinées dans des centres de multiplication.

1980, '**Arabusta**' (IFCC, Côte-d'Ivoire), variété appartenant à une nouvelle espèce, *Coffea* × *arabusta*, obtenue par croisement entre *C. canephora* 4x et *C. arabica*. Cette espèce a été créée dans le but d'améliorer la qualité à la tasse des « Robusta » dans les zones où la culture de *C. arabica* est impossible du fait de l'altitude. En raison de problèmes d'instabilité génomique provoquant une réduction de la fertilité, cette variété n'a finalement pas connu un grand développement commercial.

1986, '**Apoata**' (IAC, Brésil), variété porte-greffe pour *C. arabica*, résistante aux nématodes.

Fin des années 1990, série des '**8000**', variétés polyclonales sélectionnées dans le 'Conilon' du Brésil (INCAPER, État d'Espirito Santo, Brésil), variétés cultivées en mélange (polyclones) qui atteignent 5 tonnes/ha en conditions commerciales. Ces variétés sélectionnées dans le 'Conilon' pour le rendement, la précocité et la résistance à la sécheresse produisent, aujourd'hui, au Brésil, un tonnage très supérieur à celui des variétés hybrides de Robusta.

1999, '**Nemaya**' (CIRAD, France / Promecafé, Amérique centrale), variété hybride de clones *C. canephora*, porte-greffe pour *C. arabica*, se caractérisant par une résistance aux nématodes. Cette variété est reproduite par des graines récoltées dans des champs semenciers composés des deux clones parentaux.

2000, '**Hybrides Guinéens × Congolais**' (CIRAD, France / CNRA, Côte-d'Ivoire), variété obtenue en hybridant des caféiers de type « Guinéen » avec des caféiers de type « Congolais ». L'hétérosis et la sélection permettent à ces variétés d'être plus productives que les variétés de référence (clones).

Remarque. Pour les deux espèces de caféier cultivées, la sélection a généré de la diversité, grâce notamment à la réalisation de croisements interspécifiques ou entre écotypes géographiquement éloignés. Le caféier est d'ailleurs une espèce exemplaire dans l'intégration de la biodiversité naturelle dans les programmes de sélection. C'est particulièrement le cas de *C. canephora*, dont l'amélioration est basée sur sa diversité. La situation est très différente pour le caféier Arabica, jusqu'au développement récent de l'hybridation intra- et interspécifique. Pendant de longues années, en effet, toutes les variétés cultivées dérivait des deux types « Typica » et « Bourbon ». Cette étroitesse de la base génétique a conduit l'arabicaulture à subir des attaques parasitaires dévastatrices.

Regard sur 50 ans de sélection

Dans un premier temps, l'amélioration du caféier Arabica a exploité un certain nombre de mutants. Le fait le plus remarquable des années 1950 est d'avoir introduit le nanisme ('Caturra') qui, en permettant d'augmenter la densité de

plantation, a favorisé l'accroissement de la productivité. Une autre étape importante a été la réalisation de lignées à partir de croisements intra- ou interspécifiques. Cette stratégie a débouché sur la création de variétés résistantes aux principaux bio-agresseurs, en particulier à la rouille orangée et à l'anthracnose des baies ('Catimor'). L'avenir semble venir des variétés hybrides F_1 qui commencent à être diffusées et qui présentent l'avantage d'être vigoureuses et très productives et de faciliter l'emploi de géniteurs porteurs de résistances dominantes.

La culture plus récente de *C. canephora* au début du XX^e siècle, dans des zones impropres à la culture de *C. arabica*, a conduit à sélectionner des variétés de type population. Puis, la sélection de clones élites multipliés végétativement ou d'hybrides de clones produits en champs semenciers a permis de faire augmenter la productivité de manière spectaculaire dès les années 1970. Actuellement, des variétés hybrides de clones obtenues par croisement de clones appartenant à des groupes hétérotiques différents sont testées et semblent apporter des gains de productivité importants. L'hybridation interspécifique de *C. canephora* avec *C. congesta* (hybrides de type « Congusta ») a permis de produire des clones intéressants.

Ce progrès génétique a accompagné principalement une culture monospécifique à haute densité nécessitant l'usage d'intrants, alors que se développait simultanément une caféiculture dite « traditionnelle », peu intensive et associée à des cultures vivrières pratiquée par des petits producteurs qui ont peu, ou pas accès au progrès.

En comparaison avec d'autres espèces économiquement importantes au niveau mondial, les efforts de recherche pour l'amélioration du caféier ont été peu nombreux et essentiellement fournis par des Instituts « académiques » de pays ex-colonisateurs ou de pays producteurs.

Les programmes de sélection ont totalement négligé les paramètres de transformation industrielle, par exemple pour la fabrication de café soluble qui représente une part non négligeable de la consommation mondiale (25 à 30 %). En outre, d'une façon générale les programmes de sélection ont mis l'accent sur les performances au niveau agronomique qui se sont révélées le plus souvent défavorables aux qualités physiques du grain et à la qualité organoleptique de la boisson.

Caractères importants améliorés

C. arabica

Potentiel de productivité. En 50 ans de sélection, seul le nanisme a significativement amélioré le potentiel de productivité des lignées de *C. arabica*. Ce caractère a, en effet, une génétique très complexe. Les premières variétés de type hybride F_1 , qui exploitent l'hétérosis entre lignées subspontanées éthiopiennes et variétés naines actuelles, présentent une productivité remarquable.

Nanisme. Le nanisme a eu des effets positifs sur l'arabica culture. Il a d'abord permis d'augmenter la densité de plantation, ce qui s'est traduit par une grande amélioration de la productivité à l'hectare. Il a permis aussi de diminuer les besoins de taille. Le nanisme a également facilité la récolte, y compris mécanique, alors qu'elle représente jusqu'à 40 à 50 % du coût de production lorsqu'elle est manuelle (selon les coûts de main-d'œuvre).

Résistance aux bio-agresseurs

Rouille orangée. Cette maladie fongique, due à *Hemileia vastatrix*, existe depuis toujours en Éthiopie et dans les plantations d'Afrique de l'Est. Par contre, le climat de Java et de Ceylan, humide et de basse altitude, a favorisé l'épidémie à Ceylan en 1869 avant de se propager dans toute l'Asie. Elle a été introduite au Brésil un siècle plus tard et s'est propagée sur l'ensemble du continent américain en moins de 20 ans. De nos jours, tous les pays producteurs de café sont touchés par cette maladie. Des résistances ont été introduites à partir de croisements intra-arabica (lignées subspontanées éthiopiennes) ou interspécifiques (*C. canephora*).

Anthracnose des baies (Coffee berry disease, *CBD*). Cette maladie fongique, due à *Colletotrichum kahawae*, apparue dans les années 1920 au Kenya, est généralisée en Afrique de l'Est et au Cameroun. Les pertes maximales peuvent atteindre 80 % de la production. Des résistances à cette maladie ont été introduites à partir de lignées subspontanées d'Éthiopie et de croisements avec *C. canephora*. Cette maladie, qui ne s'est pas encore propagée en dehors de l'Afrique, reste une menace pour l'ensemble de l'arabica culture mondiale.

Nématodes (Meloidogyne *sp.* et Pratylenchus *sp.*). La monoculture du caféier en Amérique a provoqué l'accroissement des problèmes de nématodes. Des résistances ont été introduites par croisements avec des génotypes éthiopiens et *C. canephora*. Des variétés porte-greffe permettant de cultiver des caféiers Arabica dans des zones infestées ont été créées dans l'espèce *C. canephora* (Amérique centrale et Brésil).

Propriétés et composition. Le café est une boisson très aromatique appréciée pour son effet stimulant. Le café, en partie grâce à la caféine qu'il contient, stimule le système nerveux (excitant de l'activité intellectuelle), le système circulatoire (tonicardiaque) et le système urinaire (propriétés diurétiques). Le café renferme de nombreux composants dont la vitamine PP. La consommation de 4 tasses est suffisante pour couvrir 50 % des besoins journaliers en cette vitamine. La teneur en caféine des variétés classiques de *C. arabica* est comprise entre 1,2 et 1,6 %. Il y a un marché pour une version décaféinée du café, qui doit contenir moins de 0,1 % de caféine par poids sec. Le café décaféiné est fabriqué aujourd'hui grâce à des traitements industriels à l'eau ou au CO₂ supercritique, donc n'utilisant plus de solvant organique.

C. canephora

Productivité. Le gain génétique pour la productivité est de l'ordre de 400 % en 50 ans. Avant les années 1960, la plupart des variétés produisaient 0,5 tonne de café vert/ha alors que maintenant, des productions de l'ordre de 3 t/ha sont régulièrement observées en expérimentation. Ce gain important en productivité s'est fait en plusieurs étapes. Les variétés populations de *C. canephora* étaient extrêmement hétérogènes : 10 % des plantes assuraient à elles seules 50 % de la production totale. La sélection d'hybrides de clones a permis de créer des variétés présentant des rendements de l'ordre de 1 t/ha. La multiplication végétative des arbres les plus productifs repérés en plantation a permis de faire de très nets progrès en productivité par la diffusion de clones dès les années 1970. La sélection de clones élites a abouti à des variétés ayant une productivité de 2,5 t/ha. Cependant, le progrès génétique n'est pas vraiment accessible aux petits planteurs. En Côte-d'Ivoire, par exemple, 10 % seulement des planteurs utilisent des clones sélectionnés. Par ailleurs, les variétés polyclonales de 'Conilon' peuvent atteindre 5-6 tonnes, voire plus de 10 tonnes expérimentalement, et sont maintenant cultivées sur plus de 120 000 ha (sur 330 000 dans l'État d'Espirito Santo au Brésil).

Adaptation à la culture à haute densité. Des plantes à entre-nœuds relativement courts et au port compact ont été sélectionnées pour des cultures à haute densité et au mode de taille simplifié, en particulier pour reculer l'âge de la régénération (la régénération consiste à pratiquer un recépage, c'est-à-dire à tailler les tiges à la base, quand leur croissance ralentit, pour les remettre en croissance, car les fleurs sont portées en majorité par des nœuds d'un an).

Adaptation à la culture dans des sols hydromorphes. Des variétés adaptées à ce type de sol ont été sélectionnées dans des descendants de croisements interspécifiques entre *C. canephora* et *C. congensis*.

Résistance à la trachéomycose. Dans les années 1950-1960, une épidémie de trachéomycose, maladie fongique due à *Fusarium xylarioides*, *Gibberella xylarioides* et *Carbuncularia xylarioides*, a été signalée en Afrique centrale et de l'Ouest. Les caféiers sensibles, surtout des *C. liberica* mais aussi certains *C. canephora*, ont été arrachés et remplacés par des *C. canephora* de la variété 'Robusta du Congo belge'. La résistance génétique est à nouveau à l'étude, alors qu'une nouvelle épidémie ravage les vergers de la République démocratique du Congo et ceux de l'Ouganda.

Création de variétés de porte-greffe. Les programmes de sélection ont débouché sur la création de variétés de porte-greffe se distinguant notamment par leurs résistances aux nématodes. Ces variétés permettent la culture de caféiers Arabica dans des sols infestés en Amérique centrale et au Brésil.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation des mutations spontanées	OUI (<i>C. arabica</i>) Ct, mutation quasi dominante, découverte au Brésil, a permis d'obtenir des variétés naines ('Caturra'). Les variétés 'Villa Sarchi' et 'Pacas', « repérées » respectivement au Costa Rica et au Guatemala, sont naines, il s'agit également de la mutation Ct. Ma, mutation portant sur le calibre (il est exceptionnel) de la graine, mais qui s'accompagne d'une faible productivité de la plante ('Maragopipe'). lr, mutation récessive de faible teneur en caféine (0,6 %), mais qui s'accompagne d'une faible productivité de la plante ('Laurina').
Mutagenèse induite	OUI Des explants de <i>C. arabica</i> ont été cultivés <i>in vitro</i> de manière à révéler (ou provoquer) de la variation soma-clonale. Des clones ont été sélectionnés pour leur basse teneur en caféine, leur rendement et leur tolérance à la sécheresse meilleurs que ceux de la variété d'origine ('Bourbon LC').
Croisements interspécifiques	OUI 'Congusta', hybride naturel entre <i>C. congensis</i> et <i>C. canephora</i>. Ces hybrides fertiles sont exploités par des variétés clonales adaptées aux sols hydromorphes. 'Arabusta', nouvelle espèce tétraploïde issue du croisement entre <i>C. canephora</i> (dont le stock chromosomique a été doublé) avec <i>C. arabica</i>. Cette espèce a été créée dans le but d'améliorer la qualité du 'Robusta'. Sa faible fertilité lui vaut de n'être cultivée que sur des superficies extrêmement réduites. 'Hybride de Timor' et 'Icatu', variétés de <i>C. arabica</i> ayant intégré des gènes de <i>C. canephora</i> conférant des résistances à différents bio-agresseurs.
	ESSAIS (quelques exemples) Introgression de gènes de <i>C. eugenoides</i>, <i>C. liberica</i> et <i>C. pseudozanguebariae</i> Lour. (absence de caféine) et de l'espèce diploïde <i>C. brevipes</i> Hiern var. <i>heterocalyx</i> (autofertilité).
Hybridation somatique	AUCUNE, mais la culture de protoplastes est maîtrisée.
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Les caféiers Arabica sont naturellement tétraploïdes tandis que les autres caféiers sont diploïdes. Pour réaliser des croisements interspécifiques, le stock chromosomique de ces derniers est doublé à la colchicine.
Transgénèse	1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur le caféier en 1991. Malgré la grande importance économique de cette plante, la transgénèse reste une méthode très peu employée, notamment en raison de l'importance de la variabilité exploitable au sein du genre <i>Coffea</i>, d'une absence d'intérêt économique de la part des principaux acteurs de ce domaine (Monsanto, Syngenta, Dupont,...), d'une maîtrise correcte de la technique de transformation limitée à trois sites dans le monde et de la crainte des réactions du consommateur.

suite...

... suite

Essais au champ et commercialisation. Il y a plusieurs applications :

– la création de caféiers ‘Robusta’ transgéniques résistants à la mineuse des feuilles grâce à l’insertion du gène *Cry1Ac* codant une toxine de *Bacillus thuringiensis*. Ces plantes ont fait l’objet d’essais au champ en Guyane ;

– le développement à Hawaï et au Japon d’arbres sans caféine (*caféine free*) à l’aide des anti-sens ou interférences ARN de gènes impliqués dans la voie de biosynthèse (par exemple, xanthine méthyl transférase) ;

– des essais pour une synchronisation de la maturité des cerises basée, comme pour d’autres espèces, sur la régulation de la voie de biosynthèse de l’éthylène et encore d’autres essais à Hawaï pour la résistance aux nématodes.

Aucune variété transgénique n’est actuellement autorisée à être commercialisée.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative OUI (*C. arabica*)

Bouturage. Cette méthode est peu employée du fait de sa faible performance, de l’autogamie de l’espèce et des faibles températures dans les zones de culture.

Multiplication végétative *in vitro*. Elle est possible, mais un peu plus difficile que sur *C. canephora*. Elle est très peu utilisée.

Embryogenèse somatique. Le taux de multiplication est remarquable puisqu’une culture de deux mois permet d’obtenir 500 000 embryons par litre de culture. Le taux de variants sur *C. arabica* est faible (moins de 2 %). Les variants sont détectables en pépinière. Cette méthode est employée pour la multiplication rapide des variétés hybrides F₁ d’Amérique centrale, Kenya et Tanzanie, mais elle reste encore très réduite en terme de surfaces plantées.

Greffage. Dans des sols infestés par les nématodes, les caféiers Arabica peuvent être greffés sur des porte-greffe performants de l’espèce *C. canephora*, permettant ainsi l’arabica culture intensive (‘Némaya’). Mais, il ne s’agit pas, à proprement parler, de multiplication végétative car les greffons sont issus de graines.

OUI (*C. canephora*)

Bouturage horticole. Il a commencé à être utilisé dès 1950. Il est utile pour multiplier les clones d’intérêt.

Multiplication végétative *in vitro*. Le coefficient de multiplication conforme est au moins 20 fois supérieur à celui du bouturage horticole classique. Cette méthode très performante est pourtant très peu employée.

Embryogenèse somatique. Cette technique est employée pour multiplier les clones parents des variétés porte-greffe résistantes aux nématodes (Amérique centrale). La technique est également utilisée à grande échelle au Mexique, en Thaïlande et en cours de développement en Indonésie, Viêt-Nam.

Sélection sanitaire

AUCUNE

Les caféiers sont des plantes remarquables par le fait qu’elles ne sont affectées par aucun virus.

suite...

... suite

Haploïdisation	OUI Dès 1985, des plantes haploïdes doublées de <i>C. canephora</i> ont pu être obtenues par haploïdisation spontanée. La fréquence d'apparition de plantes haploïdes est faible : 10^{-4}. Cette méthode est utilisée pour fixer des lignées. Des plantes haploïdes doublées ont été utilisées pour faire des variétés hybrides F_1 qui sont en cours d'évaluation.
	ESSAIS Des plantes haploïdes de <i>C. arabica</i> apparaissent spontanément, mais elles n'ont pas été utilisées en sélection. Plusieurs techniques d'induction de plantes haploïdes (cultures d'anthers et d'ovules <i>in vitro</i>, notamment) ont été tentées, aussi bien chez <i>C. arabica</i> que <i>C. canephora</i>, pour améliorer le rendement dans la production de plantes haploïdes, mais sans réel succès.
Recours à la stérilité mâle	ESSAIS (<i>C. arabica</i>) Une stérilité mâle, découverte dans plusieurs populations éthiopiennes, est testée pour produire des variétés hybrides F_1. AUCUNE (<i>C. canephora</i>) Une stérilité mâle n'aurait d'ailleurs pas grand intérêt chez cette espèce auto-incompatible.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI (<i>C. canephora</i>) La majorité des variétés des espèces diploïdes de caféier possèdent un système d'auto-incompatibilité gamétophytique contrôlé par un locus S multiallélique. Cette auto-incompatibilité assure à ces espèces une très forte hétérozygotie.
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires servent à : – identifier le matériel, – établir des cartes génétiques, – gérer les ressources génétiques, – prédire l'hétérosis des groupes hétérotiques de <i>C. canephora</i> (pools guinéen et congolais) et de <i>C. arabica</i> (pools Typica, Bourbon et Éthiopie) ; – rechercher des QTL de résistances aux bio-agresseurs et de qualité à la tasse. Il existe, en outre, deux programmes de séquençage d'EST, l'un au Brésil, l'autre à l'université Cornell (États-Unis) en collaboration avec l'industrie.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	<i>C. arabica</i> Sélection généalogique Rétrocroisements, surtout après croisements interspécifiques <i>C. canephora</i> Sélection clonale Sélection récurrente réciproque basée sur les groupes génétiques identifiés dans l'espèce
Types variétaux	<i>C. arabica</i> Variété lignée pure ('Caturra') Variété composite, constituée d'un mélange de lignées proches ('Colombia').

suite...

... suite

Variété hybride F₁. Elle apporte vigueur, productivité, rusticité et résistances. Elle est multipliée :

- par clonage. La variété hybride F₁ peut être diffusée par multiplication directe d'arbres sélectionnés dans les hybrides par embryogénèse somatique. En 2001, il y avait déjà 19 variétés de ce type (clones) en Amérique centrale. Le bouturage horticole est utilisé au Kenya ;
- par semences. Au Kenya, il existe des variétés hybrides F₁ multipliées par semences. Celles-ci sont produites par castration et pollinisation manuelles. Elles ne connaissent pas de développement du fait du coût de l'hybridation manuelle et de la fréquence de hors type issus d'autofécondation.

C. canephora

Variété population

Variété hybride de clones

Variété clonale. Plusieurs variétés clonales interfertiles sont associées dans une plantation (variété polyclonale).

ESSAIS

Variété hybride F₁. Des variétés hybrides F₁ dont les parents sont issus de plantes haploïdes doublées sont en cours d'essais en Côte-d'Ivoire (pas encore diffusées). Ces hybrides sont remarquables par leur homogénéité qui concerne aussi bien l'architecture de la plante que sa floraison ou sa fructification.

Perspectives d'amélioration

Dans un contexte de surproduction et de prix mondiaux durablement bas, la qualité du café produit est devenue un critère primordial et incontournable de la sélection, qui doit pourtant continuer d'assurer un progrès génétique en matière de résistance, d'adaptation et de productivité, afin de contribuer à diminuer les coûts de production. Les voies choisies diffèrent pour *C. arabica* et pour *C. canephora*, mais aussi selon les différents pays concernés. De plus, le relatif échec de l'appropriation du progrès génétique par les planteurs dans bon nombre de pays conduit les sélectionneurs à porter une attention plus grande à cet aspect de leur travail.

C. arabica

Qualité à la tasse. L'amélioration de la qualité à la tasse n'a pas été réellement prise en considération et se heurte à de nombreuses difficultés.

Le café Arabica est une boisson très aromatique. L'arôme, l'astringence, l'acidité, le corps et l'amertume font partie des critères. La définition des critères de qualité en termes biochimiques n'a pas été faite et ne constitue pas un consensus réel. Sans critères de sélection clairement définis, il est difficile d'améliorer ce caractère.

De plus, la sélection pour la qualité à la tasse est délicate du fait de la complexité des facteurs interagissant sur ce caractère, outre la variété (l'environnement avec

l'altitude notamment, le traitement après récolte, le stockage, la torréfaction, l'extraction, l'eau, etc.) et de l'absence de marqueurs de qualité fiables.

Enfin, ce caractère n'est pas évalué de façon rationnelle, car il n'y a pas une seule collection rassemblant, dans un même site, les principales variétés cultivées des pays producteurs. Cette situation conduit à des comparaisons de qualité basées sur des échantillons qui n'ont été, ni cultivés, ni traités après récolte de la même façon. Des progrès ont été obtenus par Nestlé qui, pour la première fois, a pu mettre en place à l'intérieur de l'entreprise, une évaluation comparative sur 90 variétés d'Arabica et 60 variétés de Robusta représentatives d'à peu près tous les pays producteurs. Cette collection est évaluée non seulement pour la qualité à la tasse (en relation avec les consommateurs), mais aussi pour le rendement industriel et les caractéristiques spécifiques au type de produit final : café soluble, café expresso, etc. De plus, l'analyse biochimique détaillée et moléculaire permet de mettre en relation les caractéristiques biochimiques et les groupes génétiques avec les différents critères de qualité. Cette collection multilocale constitue donc un outil indispensable à l'étude de la qualité. Le CIRAD tente de collecter des données objectives sur les attributs de qualité du café vert. La méthode utilisée combine les analyses classiques avec la spectrométrie dans le proche infrarouge (NIRS), qui est déjà utilisée par certains torréfacteurs. La constitution d'une base de données de référence, à partir de cafés aux qualités gustatives reconnues, doit permettre de mieux connaître la variabilité génétique au sein des espèces cultivées, de mesurer les effets des introgressions et de définir des stratégies d'amélioration pour ces caractères.

L'amélioration de la qualité à la tasse est limitée par le manque de coordination entre les sélectionneurs et industriels utilisateurs qui sont pourtant en contact avec les consommateurs. Les sélectionneurs ont toujours été plus proches du planteur que du consommateur.

Productivité. L'accroissement de la productivité est indispensable pour améliorer les revenus de l'agriculteur, mais il est clair que, s'il dépasse l'augmentation de la demande mondiale, il conduira à l'élimination à terme de certains pays producteurs avec toutes les conséquences socio-économiques locales et celles de situation monopolistique de quelques pays producteurs. Jusqu'à présent, si ce n'est par l'adoption de variétés naines, cette caractéristique n'a pas été beaucoup améliorée du fait d'une méconnaissance du fonctionnement du peuplement. Des études montrent que la productivité est liée à la vigueur au stade jeune et à la ramification secondaire des plantes. Il semble très important de sélectionner des plantes vigoureuses pour éviter le phénomène de *dieback*, caractérisé par la mort de branches, que l'on observe sur des génotypes très productifs. La prise en compte de ces données de physiologie, ainsi que la généralisation des variétés hybrides F_1 , devraient permettre d'accroître sensiblement la productivité de l'arabica culture.

Adaptation. L'adaptation des caféiers Arabica, à des conditions climatiques tropicales d'altitude, et la faible variabilité génétique de l'espèce limitent l'extension de leur culture. Il serait intéressant de développer des variétés adaptées à différentes situations.

Adaptation au froid. Les caféiers subissent des dégâts dus au gel, notamment au sud du Brésil et au nord du Viêt-Nam, comme dans les zones de très haute altitude.

Adaptation aux basses altitudes. Les caféiers Arabica cultivés en basse altitude présentent une sensibilité accrue à la rouille orangée et produisent un café de moindre qualité.

Adaptation aux hautes altitudes. Les conditions en haute altitude sont favorables au développement de l'anthracnose des baies (Afrique) et d'un champignon *Mycena citricolor* (Amérique centrale).

Toutefois, si l'adaptation de variétés à certaines conditions pouvait permettre une culture intensive, avec de très bas coûts de production, elle pourrait présenter le même type de risques que l'accroissement de la productivité.

Tolérance durable à la rouille orangée. La lutte contre la rouille orangée repose essentiellement sur la résistance issue de *C. canephora* introgressée dans la variété 'Hybride de Timor'. Des tolérances polygéniques sont recherchées dans les génotypes éthiopiens.

C. canephora

Qualité à la tasse. L'analyse de la variabilité disponible chez *C. canephora* a révélé qu'il existait une grande diversité pour ce caractère qui devrait donc pouvoir être amélioré par sélection classique. Le manque de connaissance des molécules intervenant dans l'arôme du café, l'inexistence de collections de référence de caféiers et la distance entre la sélection et l'industrie (cf. *C. arabica*) sont autant d'obstacles à la réalisation de variétés présentant une meilleure qualité à la tasse. La création de variétés à taux réduit en caféine est, par ailleurs, tout à fait envisageable.

Productivité. Une bonne diffusion des semences des variétés hybrides de clones auprès du plus grand nombre possible de planteurs devrait permettre d'accroître considérablement la productivité de la culture du caféier Robusta. Mais, la multiplication par bouturage ou embryogenèse somatique de clones (par exemple, 'Conilon' au Brésil) semble avoir un meilleur avenir que la multiplication par semences d'hybrides de clones, surtout si l'on veut tenir compte de critères de qualité plus faciles à exacerber dans la stratégie clonale que dans la stratégie « hybrides de clones » qui sont des populations.

Résistance à la trachéomycose. Une épidémie touche de nouveau l'Afrique centrale et de l'Est (principalement Ouganda et République démocratique du Congo). La sélection de nouvelles résistances est activement recherchée.

Résistance aux insectes. La mineuse des feuilles (*Leucoptera coffeina* et *L. meyricki*) est susceptible d'occasionner des dégâts importants, notamment au Brésil, quant au scolyte des baies du caféier (*Hypothenemus hampei*, *coffee berry borer* ou *broca*, en espagnol), il constitue l'insecte ravageur majeur pour le caféier, au niveau mondial. Ce dernier n'est, jusqu'à présent, contrôlé que par voie chimique, voire partiellement par voie biologique. Les méthodes expérimentées pour introduire des résistances chez les deux espèces cultivées sont les croisements interspécifiques et la transgénèse.

Mécanisation. La mécanisation de la culture et de la récolte a été développée au Brésil (grandes plantations), à Hawaï et en Australie (coût prohibitif de la main-d'œuvre). Des variétés adaptées ont été sélectionnées (lignées pures homogènes de *C. arabica*). Des hybrides F_1 , obtenus par croisements entre des lignées haploïdes doublées, présentent aussi une homogénéité remarquable (pour les caractères d'architecture de la plante, de floraison et de fructification) qui ouvre également la perspective d'une mécanisation de la récolte. Ces hybrides sont encore au stade expérimental. Il reste aussi à démontrer l'intérêt, au niveau économique et social, d'introduire la mécanisation dans la culture du caféier dans les pays en voie de développement.

Méthodes à développer

Le caféier se prête bien à une large exploitation des ressources génétiques. Les croisements interspécifiques sont en effet tous possibles au sein du genre *Coffea* qui comprend une centaine d'espèces. De plus, la cryoconservation permet de conserver efficacement les ressources génétiques.

D'importants progrès sont aussi escomptés venant de la génomique. Des marqueurs moléculaires de gènes d'intérêt et des QTL de caractères agronomiques, qui ont déjà été identifiés, commencent à être utilisés en sélection assistée par marqueurs. De plus, des gènes intervenant dans des résistances ou des étapes clés du métabolisme sont en cours de clonage. Comme pour *C. canephora*, les gains génétiques constatés chez les hybrides F_1 de *C. arabica* permettent d'envisager pour cette espèce la mise en place d'un schéma de sélection récurrente, qui pourrait faire intervenir les variétés introgressées.

Inscription et protection des variétés

Les variétés de caféier ont largement été diffusées selon la loi du libre échange. Les premiers programmes de sélection qui ont été engagés au début du XX^e siècle à Java et au Brésil, se sont amplifiés dans les années 1960. Les stations de recherche des différents états ont alors créé leurs propres listes avec des variétés issues de leur recherche et d'autres provenant d'autres états et souvent rebaptisées. Bien souvent, ces centres de recherche assurent la multiplication et la diffusion des variétés. Depuis la conférence de Rio, un certain nombre de

pays cherchent à protéger ce qu'ils considèrent comme leurs variétés. Les deux voies de protection possibles sont le COV et le brevet :

– **le COV.** Un des principaux problèmes pour la mise en place d'une protection par COV est la constitution d'une collection de référence. Pour l'instant, toutes les tentatives du Réseau de recherche café en Afrique (IPGRI/RECA) visant à regrouper les ressources génétiques caféières en Afrique se sont avérées infructueuses, les signatures de la vingtaine d'états africains concernés par la culture du caféier n'ayant jamais pu être toutes réunies. Une autre limite à la protection par COV est que peu d'états cultivant le caféier font partie de l'UPOV ;

– **le brevet.** Actuellement, ce sont des entreprises internationales qui tentent dans certains pays de protéger les variétés par brevet. Ainsi, la société *Kraft Food Inc.* a protégé la variété 'Bourbon LC', variant somaclonal de la variété 'Laurina'. Cette nouvelle variété présente un bon rendement et une bonne résistance à la sécheresse, tout en conservant la faible teneur en caféine de 'Laurina'. Il s'agit de valoriser des variétés protégées sous forme de contrats de production.

Pour en savoir plus

Anthony F., Bertrand B., Quiros O., Wilches A., Lashermes P., Berthaud J. et Charrier A., 2001. Genetic diversity of wild coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers. *Euphytica*, 118 (1), 53-65.

Barton C.R., Adams T.L. et Zarowitz M.A., 1991. Stable transformation of foreign DNA into *Coffea arabica* plants. Dans : *Proceeding of 14th Colloquium of International Coffee Science Association* (ASIC), San Francisco, 460-464.

Berthaud J., 1980, L'incompatibilité chez *Coffea canephora* : méthode de tests et déterminisme génétique. *Café, cacao, thé*, 24, 267-274.

Berthaud J., 1986. *Les ressources génétiques pour l'amélioration des caféiers africains diploïdes*. Éditions ORSTOM, Travaux et documents, Paris, n° 188, 372 p.

Bouharmont P., 1995. *La sélection du caféier Arabica au Cameroun (1964-1991)*. CIRAD éditions, Montpellier, France, 125 p.

Capot J., 1972. L'amélioration du caféier en Côte-d'Ivoire. *Café, cacao, thé*, 16, 3-18.

Carneiro M.F., 1997. Coffee biotechnology and its application in genetic transformation. *Euphytica*, 96 (1), 167-172.

Charrier A. et Eskes A.B., 1997. Les caféiers. Dans : *Amélioration des plantes tropicales*. A. Charrier, M. Jacquot, S. Hamon et D. Nicolas, éd., Collection Repères CIRAD-ORSTOM, Montpellier, 171-196.

CIRAD/MOCA, 2003. *Cafés : terroirs et qualités*. C. Montagnon, éd., CIRAD Éditions, Montpellier, 154 p.

Etienne H., Dussert S., Fernandez D., Lashermes P. et Bertrand B., 2002. Biotechnological applications for the improvement of coffee (*Coffea arabica* L.). *In vitro Cell. Dev. Biol. – Plant*, 38 (2), 129-138.

Lashermes P., Andrzejewski S., Bertrand B., Combes M.C., Dussert S., Graziosi G., Trouslot P. et Anthony F., 2000. Molecular analysis of introgressive breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 100 (1), 139-146.

Lashermes P., Couturon E. et Charrier A., 1994. Doubled haploids of *Coffea canephora* : development, fertility and agronomic characteristics. *Euphytica*, 74, 149-157.

- Leroy T., Henry A.M., Royer M., Altosaar I., Frutos R., Duris D. et Philippe R., 2000.** Genetically modified coffee plants expressing the *Bacillus thuringiensis cry1Ac* gene for resistance to leaf miner. *Plant Cell Rep.*, 19 (4), 382-389.
- Leroy T., Montagnon C., Cilas C., Yapo A., Charmetant P. et Eskes A.B., 1997.** Reciprocal recurrent selection applied to *Coffea canephora* Pierre. 3. Genetic gains and results of first inter-group crosses. *Euphytica*, 95, 347-354.
- Montagnon C., Guyot T., Cilas C. et Leroy T., 1998.** Genetic parameters of several biochemical compounds from green coffee, *Coffea canephora*. *Plant Breed.*, 117, 576-578.
- Montagnon C., Leroy T. et Eskes A.B., 1998.** Varietal improvement of *Coffea canephora*. I. Criteria and breeding methods. *Plant. Rech. Dév.*, 5, 18-28.
- Montagnon C., Leroy T. et Eskes A.B., 1998.** Varietal improvement of *Coffea canephora*. II. Breeding programmes and their results. *Plant. Rech. Dév.*, 5, 18-28.
- Paillard M., Lashermes P. et Pétiard V., 1996.** Construction of a molecular linkage map in coffee. *Theor. Appl. Genet.*, 93, 41-47.
- Pétiard V., Bollon H., Ducos J.-P., Florin B., Paillard M., Spiral J. et Zamarripa A., 1993.** Biotechnologies appliquées au caféier. Dans : *XV^e Colloque scientifique international sur le café*. Éditions ASIC, Paris, 56-66.
- Spiral J. et Pétiard V., 1993.** Développement d'une méthode de transformation appliquée à différentes espèces de caféiers et régénération de plantules transgéniques. Dans : *XV^e Colloque scientifique international sur le café*. Éditions ASIC, Paris, 115-122.
- Wintgens J.N., 2004.** *Coffee : Growing, Processing, Sustainable Production*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 476 p.
- Zelzlina S., Soranzio M., Rovelli P., Krieger M.A., Sondahl M.R. et Graziosi G., 2001.** Molecular characterisation of the cultivar Bourbon L.C. Dans : *XIX^e Colloque scientifique international sur le café*, Éditions ASIC, Trieste (CDRom).

La carotte

Daucus carota L. ($2n = 2x = 18$)
(Apiacées ou Ombellifères)

Présentation de l'espèce

La carotte sauvage (*Daucus carota* L.) est présente dans toute l'Europe, dans la Région méditerranéenne et en Asie centrale. Les Grecs et les Latins connaissaient la carotte surtout pour ses fruits médicinaux. Il est possible qu'ils en aient aussi consommé la racine, mais il est très difficile de distinguer la carotte du panais (*Pastinaca sativa* L.) et d'autres Apiacées (Ombellifères) dans les textes. Quoi qu'il en soit, les carottes actuellement cultivées sont probablement originaires d'Afghanistan. La plupart étaient violettes mais, il devait aussi y avoir quelques mutants jaunes. Les premières descriptions non ambiguës de carotte datent du XII^e siècle et proviennent d'un auteur arabe, Ibn al' Awwâm, vivant en Espagne. Elle a été introduite en France, *via* l'Italie, au XIV^e siècle. La carotte violette n'a pas eu un grand succès en France si bien qu'au XVI^e siècle, seule la carotte jaune était encore cultivée. Par contre, la carotte violette s'est maintenue en zone méditerranéenne (Turquie, Égypte, Espagne). Cette dernière a été cultivée pour l'alimentation humaine jusqu'au début du XX^e siècle. Actuellement, la carotte jaune est utilisée pour l'alimentation animale, mais revient depuis peu pour les amateurs de curiosités culinaires. Quant à la carotte violette, elle est cultivée comme source de colorant.

L'origine de la carotte orange à carotène est encore controversée. Il semblerait qu'elle soit apparue au XVII^e siècle et qu'elle ait donné, après sélection, les deux grands types *Long orange* (grande et grosse racine) et *Horn* (racine plus fine, courte et colorée) qui sont à l'origine des variétés de carotte à carotène, cultivées actuellement. Au fil des siècles, ces types de carotte ont été sélectionnés pour donner une racine de couleur plus foncée et ont finalement remplacé la carotte jaune. La 'Carotte rouge demi-longue nantaise' est apparue au milieu du XIX^e siècle. Il a fallu attendre le début du XX^e siècle pour que le cœur (cylindre central fait de xylème) de la carotte devienne tendre avec l'apparition de la 'Carotte rouge demi-longue nantaise améliorée'.

La carotte cultivée est une espèce bisannuelle, allogame et multipliée par semences. Des carottes sauvages indigènes (qui sont annuelles) peuvent être présentes autour des champs. Elles sont parfaitement interfertiles avec les carottes cultivées. Dans les champs de production de semences (particulièrement dans le cas des hybrides), où une pollinisation par des carottes sauvages peut être assez courante, c'est un problème important. Des semences d'hybrides accidentels entre carotte cultivée et carotte sauvage peuvent alors y être récoltées. En culture, elles donneront des plantes qui montent à graines dès la première année, avec le risque de bloquer les machines arracheuses au stade de la récolte des racines.

La carotte est une espèce ayant une grande variabilité. Il existe des variétés de carotte dont les racines peuvent présenter des formes, tailles et couleurs très variées. Par ailleurs, la variabilité dans les carottes sauvages (en particulier, les 12 sous-espèces sauvages de l'espèce *Daucus carota* et une autre espèce *D. capillifolius* Gilli) est probablement très large, celles-ci se croisant assez facilement avec la carotte cultivée en donnant des hybrides fertiles. Cette variabilité, assez facilement accessible pour les sélectionneurs, est loin d'avoir été complètement exploitée. Depuis janvier 2000, un programme ECP/GR a été lancé dans le but d'organiser la gestion des collections de ressources génétiques de carotte. Aux États-Unis, le *National Plant Germplasm System* (NPGS) maintient d'importantes collections. Une des stations (Ames en Iowa) maintient 1 100 génotypes. En France, il existe depuis 1996, un « Réseau ressources génétiques Carotte et autres *Daucus* » animé par l'INH à Angers (Maine-et-Loire) qui, sous l'égide du BRG, a constitué une collection nationale « Ombellifères potagères ».

Production et utilisation

Le produit récolté, la carotte, est une racine pivotante tubérisée.

La production mondiale de carotte est de 24 millions de tonnes. Les principaux producteurs sont la Chine (8,3 millions de tonnes), la Russie (1,8 million de tonnes) et les États-Unis (1,6 million de tonnes). La production française est de près de 0,7 million de tonnes (données FAO, 2004). On distingue la carotte potagère, utilisée pour l'alimentation humaine (marché du frais et industrie) et la carotte fourragère destinée à l'alimentation animale.

Alimentation humaine

Marché de frais. Environ 80 % de la production française lui est destinée. La carotte peut être de primeur (vendue en bottes avec le feuillage ou non) ou de garde. En France, les variétés pour le marché de frais sont actuellement essentiellement du type « Demi-longue nantaise améliorée ».

Industrie. Elle représente environ 20 % de la production française.

– « Petit pois/carotte ». La carotte pour mélanges « petit pois/carotte » appertisés ou surgelés est produite à partir du type « D'Amsterdam ».

- « Macédoine ». Les cubes pour la macédoine de légumes sont réalisés avec des types de carotte donnant de grosses racines de type « De Flakkee » (ou « De Colmar »).
- Jus de carotte. Le jus de carotte est généralement élaboré à partir de variétés riches en carotène.
- Carotènes et fibres. Du carotène est extrait de la carotte pour produire des colorants alimentaires. Des fibres peuvent aussi être extraites de la carotte et servir dans l'industrie agro-alimentaire.
- Autres utilisations (4^e gamme, 5^e gamme, produit déshydraté pour soupe, purée ou rondelles surgelées, nourriture pour bébé,...). Ces produits sont réalisés principalement avec des carottes à grosses racines de type « De Flakkee » (ou « De Colmar ») mais aussi avec des carottes de type « Demi-longue nantaise », voire de type « Demi-longue de Chantenay ».

Alimentation animale. La carotte blanche ou jaune est utilisée comme plante fourragère. L'appétibilité de la carotte est bonne et elle est riche en énergie. Par contre, la teneur en matière sèche est médiocre. Des déchets de traitements industriels de carottes peuvent aussi servir à nourrir les animaux.

Industrie non alimentaire. Du carotène et des oléorésines sont extraits de la carotte pour les industries pharmaceutiques et cosmétiques.

Histoire des variétés cultivées en France

Carotte potagère pour le marché de frais

L'histoire des variétés de carotte utilisées en France est très liée à l'évolution du couple « marché-produits » en Europe : l'évolution variétale, celle de l'industrialisation de sa production et celle des technologies permettant son transport sont autant de paramètres qui ont entraîné en un quart de siècle la spécialisation des bassins de production. Traditionnellement ce légume, à connotation « santé-fraîcheur », fragile vis-à-vis du transport (90 % d'eau), était consommé dans la région de production. Pour cette raison, on trouvait, sur chaque marché, le produit des sélections locales, maintenues par les producteurs eux-mêmes.

Bien que ce légume soit essentiellement consommé en automne et en hiver, il fallait répondre à une demande annuelle et en particulier produire de la « carotte nouvelle » et de la carotte d'hiver. La production pour l'automne est facile dans toute la France.

Depuis les années 1950, des régions se sont spécialisées pour la production sur certaines périodes en organisant les conditions de sa conservation et de son transport pour maintenir sa fraîcheur sur de plus en plus longues distances. En raison de la diversité des conditions climatiques de la France, cette spécialisation a permis le maintien d'une production globalement nationale. Jusqu'à cette période, chaque pays produisait une carotte d'une morphologie particulière et la notion de variété était liée à cette morphologie. On distinguait alors :

- une forme « demi-longue, obtuse », variable en diamètre et en longueur, avec en France et en Italie le type « Demi-longue nantaise » (et « De Colmar », synonyme de « De Flakkee »), et dans les pays du nord de l'Europe hors Royaume-Uni, les types « D'Amsterdam », « Feonia », « Hammer » et « De Flakkee » ;
- et une forme « obconique, obtuse » au Royaume-Uni avec le type « Demi-longue de Chantenay à cœur rouge ».

À l'ouverture du catalogue en 1952, les variétés furent classées selon ces variations morphologiques ou selon des différences physiologiques importantes reconnues par les professionnels à l'intérieur de ces types.

Avec la sécheresse de l'année 1976 dans la moitié nord de la France, la production nationale a été pratiquement nulle de septembre 1976 à mai 1977. Pour combler ce manque, des carottes ont été importées (en particulier du Bénélux, d'Italie et même d'Amérique du Nord et d'Australie). L'année 1976 marque le début de la nouvelle donne du marché européen en matière de carotte : le modèle français « Demi-longue nantaise » qui était seulement français devient le modèle européen. Cette période coïncide avec l'arrivée des variétés hybrides européennes qui va radicalement uniformiser le type de variétés cultivées dans le type morphologique traditionnel français « Demi-longue nantaise ». Parmi les dizaines de variétés hybrides inscrites depuis 1977 au catalogue européen, les quelques variétés qui se sont implantées dans les grands bassins de production d'Europe, anciens ou nouveaux, le doivent à leurs caractéristiques physiologiques (agro-climatiques) d'adaptation aux zones concernées, la morphologie de leur racine étant très voisine. Une variété est le plus souvent à vocation européenne dès lors qu'elle correspond au type physiologique recherché du nord au sud de l'Europe, mais peut être « détrônée » en quelques années.

L'histoire des variétés cultivées en France qui se confond avec celle des variétés cultivées en Europe, peut se résumer ainsi par type physiologique.

Pour la production de printemps-été

Type « ronde-courte », remarquable par sa précocité en Région parisienne :

'À forcer parisienne', 'Bellot', 'Davanture' ou 'Rouge de Nancy', 'Demi-longue de Croissy', 'Courte améliorée à forcer' ou 'De Saint Fiacre', variétés populations de très grande « précocité » (en raison de leur taille courte donc atteignant rapidement un volume visuel appréciable), très utilisées par les maraîchers pour les cultures sous châssis jusqu'au milieu des années 1970. Il s'agit de variétés populations de faible rendement, traditionnellement vendues en bottes et très peu cultivées actuellement.

Type « demi-longue précoce » (racine d'une longueur de 15-20 cm), remarquable par son aptitude au semis d'automne-hiver (et donc par sa résistance à la montée à graines) :

1763, **'Early half long horn'**, première véritable variété de carotte demi-longue à carotène. Une carotte demi-longue à l'époque signifiait 8-10 cm.

1887, '**Demi-longue de Carentan**', 1935, '**Demi-longue nantaise à forcer**', 1935, '**Touchon**', variétés populations d'origine différente, elles se sont montrées bien adaptées aux conditions nouvelles de la Région nantaise, puis récemment aux conditions du midi de la France.

1977, '**Tancar**' (Clause, France), première variété hybride de type « Demi-longue nantaise à forcer ». Elle a pris très rapidement le marché de la Région nantaise grâce à son rendement et sa précocité de tubérisation et de coloration. Elle a connu un développement international (Italie et Israël, en particulier). Elle a été supplantée par 'Nantucket' en raison du meilleur comportement de cette dernière vis-à-vis de l'éclatement.

1984, '**Nantucket**' (Bejo, Pays-Bas), variété hybride très utilisée pour le marché de primeur. Cette variété a, en effet, un bon comportement vis-à-vis de l'éclatement. Elle est, de plus, particulièrement bien adaptée au semis sous abri (tunnel) avant l'hiver dans la Région nantaise où elle a été beaucoup cultivée jusqu'en 1990 (depuis cette date, la culture de la carotte a beaucoup diminué dans la Région nantaise).

1987, '**Presto**' (Vilmorin, France), première variété hybride de type « Touchon ». Cette variété précoce à racine très cylindrique, a connu un grand développement dans le sud de la France.

1989, '**Nansen**' et 1991, '**Nanda**' (Nickerson-Zwaan, Pays-Bas), variétés hybrides intéressantes pour leur précocité, leur couleur et leur résistance à l'éclatement de type intermédiaire entre les types « Nantaise » et « D'Amsterdam ». Elles sont cultivées principalement dans les Landes en semis d'automne et d'hiver et se caractérisent par leur précocité, leur résistance à l'éclatement au champ et à la montée à fleurs prématurée. La racine a une coloration rouge orangé assez foncée.

Pour la production d'automne-hiver

Ce sont des types « demi-longue ».

1864, '**Demi-longue nantaise**', variété population dont l'extrémité de la racine est « boutée » (c'est-à-dire obtuse), bien lisse, exempte de collet vert, orange foncé, sucrée et présentant une très bonne qualité gustative.

Début du XX^e siècle, '**Demi-longue nantaise améliorée**', variété voisine de 'Demi-longue nantaise' mais possédant un cœur plus coloré (rouge). C'est une variété population qui comporte plusieurs maintenances, chacune étant bien adaptée à un bassin de production (par exemple, race Caillard, race d'Aubagne,...). Parmi elles, la race 'Tip-top' (Sluis and Groot, Pays-Bas) (cf. p. 196) représentait, dans les années 1970, sans doute plus de 50 % des 'Demi-longue nantaise améliorée' en France et en Europe en raison de sa vigueur, de son rendement et de la longueur de sa racine.

1935, '**Touchon**', variété population, sélection issue du type « Demi-longue nantaise améliorée ». Sa racine est volumineuse, très cylindrique, allongée et à

collet fin et un peu hors terre. Elle a une précocité satisfaisante et se conserve très bien. Cette variété est surtout cultivée dans le sud de la France. C'est dans cette population qu'ont été introduites par l'INRA d'Avignon (Vaucluse) à partir de 1963, les deux stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques d'origine nord-américaine.

XX^e siècle, '**De la Halle**', variété population, autre sélection dans le type « Demi-longue nantaise améliorée », remarquable par son aptitude à la conservation en raison de la morphologie de sa racine. Le collet se maintient, en effet, dans le sol au contraire d'un type « Touchon ». Elle est très bien adaptée à la culture dans le département de la Manche et dans le secteur de Saint-Benoît-sur-Loire (Loiret).

1977, '**Nandor**' (Clause, France), première variété hybride en Europe. Cette variété de type « Demi-longue nantaise améliorée » a révolutionné la culture de la carotte en France. Elle représente, en effet, un très bon compromis pour l'homogénéité, le rendement et la qualité avec notamment une bonne résistance à l'éclatement, une bonne adaptation à l'arrachage mécanique et une grande facilité d'équeutage (c'est-à-dire l'élimination du feuillage ou fanes). Cette variété a aussi permis d'évoluer vers le semis de précision, en raison de la qualité de la graine hybride (levée et vigueur) qui a rendu possible ce type de semis, supprimant ainsi l'éclaircissage manuel des plantules, précédemment nécessaire après semis.

1980, '**Nanco**' (Vilmorin-Andrieux, France), variété hybride de type « Demi-longue nantaise améliorée ». Cette variété a, en particulier, une précocité intéressante, ce qui a lui valu un développement dans le sud de l'Europe.

1986, '**Major**' (Clause, France), variété hybride de type « Demi-longue nantaise améliorée » ayant un bon comportement vis-à-vis du gel. C'est une carotte d'hiver typique pour sa conservation en terre (en France, les carottes d'hiver sont conservées au champ dans le sol grâce à une épaisse couverture de paille ou bien elles sont recouvertes de terre après arrachage).

1990, '**Senior**' (Clause S P, France), variété hybride de type intermédiaire entre « Demi-longue nantaise améliorée » et « De Colmar ». Cette variété rustique a un bon comportement vis-à-vis d'*Alternaria dauci* grâce à la capacité de repousse de son feuillage.

1991, '**Bolero**' (Vilmorin, France), première variété hybride de type « Demi-longue nantaise » tolérante à *Alternaria dauci* et à la maladie de la tache. Sa racine est longue et cylindrique. Elle est très cultivée dans les Landes, région où la culture de la carotte est pratiquée à grande échelle depuis le début des années 1990.

1996, '**Maestro**' (Vilmorin, France), variété hybride de type « Demi-longue nantaise » tolérante à *Alternaria dauci* et à la maladie de la tache. 'Bolero' et 'Maestro' connaissent un grand développement commercial dans le sud de la France et de l'Europe, en raison de leur bon comportement en culture, de leur

vigueur et de leur bonne résistance à la montée à graines. Elles correspondent également à une bonne maîtrise de la production de semences et à une grande qualité de graines (bonne aptitude à la levée à haute température).

Carotte potagère d'industrie

1621, '**Long Orange**' (maraîchers allemands), variété population du type carotte rouge orangé, longue, tardive et de bonne conservation hivernale. C'est un des deux types de carotte cultivée à carotène, qui a été sélectionné au XVII^e siècle.

2^e moitié du XVII^e siècle, '**D'Amsterdam de pleine terre**', variété population de carotte courte à teneur élevée en carotène. Elle a été sélectionnée par les maraîchers d'Utrecht (Pays-Bas) dans le type le plus mince de 'Rouge demi-longue pointue' issue de 'Long Orange'. Ce type de carotte est cultivé à très haute densité pour la réalisation de mélanges petit pois /carotte.

Vers 1850, '**De Flakkee**' ou '**De Colmar**', variété population sélectionnée pour les sols lourds est issue de l'ancienne variété 'Flanders'. C'est une variété très rustique de fort rendement. Elle est bien adaptée à la production de cubes pour fabriquer de la macédoine de légumes. Certaines de ses améliorations récentes ont conduit à la sélection de géniteurs parentaux performants pour la création de variétés hybrides.

1965, '**Juwarot**' (Julius Wagner, Allemagne) et '**Bauers Kieler Rote**' (Firma Erich Luhn KG, Allemagne), variétés se distinguant par des teneurs élevées en α -carotène et β -carotène. Elles possèdent néanmoins le défaut d'être trop fibreuses et d'être très sensibles aux virus. Elles sont utilisées pour la production de jus de carotte.

Carotte fourragère

'**Jaune obtuse du Doubs**', variété population très ancienne de carotte jaune.

'**Blanche à collet vert très hors terre**', variété population très ancienne de carotte blanche.

Remarque. Il y a eu une standardisation des carottes sur les marchés mondiaux avec l'adoption, depuis 15 ans, des carottes de type « Nantaise » (en fait 'Demi-longue nantaise améliorée'). Ce type « Nantaise » est majoritaire, principalement en Europe et dans quelques autres zones. L'idéotype européen de la carotte est une racine de 15 à 20 cm de long et de 25 à 40 mm de diamètre. Actuellement, près de 90 % des variétés inscrites en France sont hybrides.

Il existe des types cultivés dans le monde ayant des morphologies différentes. On peut citer, notamment, aux États-Unis, le type « Imperator » à racine longue, dure et riche en terpénoïdes et au Japon, le type « Kuroda » à racine de forme cylindro-conique obtuse.

Regard sur 50 ans de sélection

La sélection massale a, dans un premier temps, été la meilleure façon d'améliorer les variétés populations de carotte. En 1963, l'INRA a introduit les deux stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques « anthères brunes » et « étamines pétaloïdes » d'origine nord-américaine dans le type « Nantaise », puis les a distribuées en 1969 sous forme de lignées aux sélectionneurs privés, membres de l'Association des créateurs de variétés potagères et florales (ACVPPF). Ceci a ouvert la voie à la production de variétés hybrides (hybrides trois voies, puis hybrides simples) de carotte.

La généralisation de l'utilisation des variétés hybrides, responsable de l'accroissement du rendement et de l'homogénéité des racines, est le fait marquant de l'amélioration de cette espèce.

Caractères importants améliorés

Rendement. Le rendement, surtout dans le cas des récoltes précoces, a été bien amélioré grâce à l'utilisation des variétés hybrides. Les rendements pour la carotte de primeur, la carotte pour le marché de frais et la petite carotte de transformation sont maintenant respectivement de 40 à 60 t/ha, 40 à 100 t/ha et 30 à 40 t/ha. En plus de l'amélioration des autres caractéristiques mentionnées ci-après, l'introduction des hybrides a essentiellement eu pour conséquence d'augmenter le rendement commercial en diminuant les déchets.

Aptitude à la mécanisation. Le passage aux variétés de type hybride s'est aussi traduit par une meilleure homogénéité qui s'est accompagnée d'une amélioration de la qualité de la graine (calibrage notamment). Ceci a permis l'introduction de l'emploi de semoirs pneumatiques. Il n'est plus nécessaire d'éclaircir les plantules et il y a beaucoup moins de racines difformes. Le passage aux variétés hybrides ainsi que la sélection de variétés au feuillage érigé et résistant à l'arrachage ont permis de mécaniser la culture.

Aptitude à une récolte tardive en hiver. Dans les bassins traditionnels de production, la possibilité de récolter tardivement en hiver, et même jusqu'en avril, a nécessité une sélection particulière : les plantes doivent être vigoureuses avec un feuillage et une racine résistants aux basses températures.

Diversification au niveau de l'Europe. Des évolutions dans les formes et calibres de carotte en fonction des demandes des producteurs (facilité d'arrachage,...), des distributeurs (résistance à la cassure,...) et des consommateurs des différents pays (les Italiens aiment les carottes longues et cylindriques tandis que les Néerlandais aiment les carottes plus larges et coniques) ont pu être obtenues.

Présentation de la carotte. Des efforts ont été réalisés afin de sélectionner des variétés de bonne présentation : péricarpe lisse et brillant, pivot très fin, couleur uniforme entre le cœur (xylème) et la zone intermédiaire (phloème), et disparition de la teinte verte au niveau du collet. La précocité observée dans le cas des variétés hybrides permet d'acquérir plus rapidement la bonne coloration, ce qui est très intéressant pour les cultures de primeur.

Qualité nutritionnelle. Des variétés très riches en carotène (provitamine A) ont été sélectionnées.

Résistance aux maladies fongiques

Alternariose (*Alternaria dauci*). Cette maladie très importante et très répandue peut causer une perte totale du feuillage dans le sud de la France en production d'automne-hiver. Le recours à des variétés résistantes à cette maladie facilite la culture de la carotte et limite les traitements phytosanitaires ('Bolero').

Oïdium (*Erysiphe heraclei*). Il existe des résistances dans le matériel cultivé. Elles sont utilisées en sélection. Une résistance a été découverte dans la carotte sauvage *D. carota* ssp. *dentatus* Bertol., mais il semble qu'elle ait été peu ou pas utilisée.

Cercosporiose (*Cercospora carotae*). Une résistance à cette maladie a été découverte dans la variété 'WCR-1 Wisconsin' et a, depuis, été introduite dans d'autres variétés.

Maladie de la tache ou cavity spot. Elle est due principalement à *Pythium violae* et *P. sulcatum*. Des résistances partielles polygéniques sont actuellement utilisées en sélection.

Résistance à la montée à graines. Elle permet de réaliser un semis d'automne pour une récolte précoce de qualité au printemps.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation de mutations spontanées	OUI (quelques exemples) Stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques (type « étamines pétaloïdes » et type « anthères brunes »). <i>Ms-1</i> , <i>Ms-2</i> et <i>Ms-3</i> , exemples de gènes de maintien de la stérilité mâle (type « anthères brunes ») découverts dans la variété 'Tendersweet'. Gène <i>A</i> , de synthèse d' α -carotène, découvert dans la variété 'Kintoki'. Gène <i>L</i> , responsable de la synthèse de lycopène découvert dans la variété 'Kintoki'. Gène <i>Ce</i> , de résistance à la cercosporiose (<i>Cercospora carotae</i>) découvert dans la variété 'WCR-1 Wisconsin'. Gène <i>Eh</i> , de résistance à l'oïdium (<i>Erysiphe heraclei</i>), découvert dans la carotte sauvage <i>D. carota</i> ssp. <i>dentatus</i> .
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	ESSAIS Le seul croisement interspécifique réussi est celui avec <i>D. capillifolius</i> . Il pourrait permettre la création de variétés cultivées résistantes à la mouche de la carotte. Les autres sont des croisements avec des sous-espèces sauvages : <i>D. carota</i> ssp. <i>gadecaei</i> (Rouy & E. G. Camus) Heywood et <i>D. carota</i> ssp. <i>azoricus</i> (résistance aux nématodes <i>Meloidogyne</i> spp.) et <i>D. carota</i> ssp. <i>dentatus</i> (résistance à l'oïdium).

suite...

... suite

Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS Des essais ont été réalisés dans les années 1980, mais sans suite.
Transgénèse	La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce au début des années 1990. Caractères travaillés et essais au champ. Des plantes résistantes aux champignons (surexpression de gènes de chitinase) et d'autres tolérantes à un herbicide (glufosinate) ont été obtenues. Des plantes transgéniques surproduisant un auto-antigène humain, l'acide glutamique décarboxylase (GAD65), ont été créées de manière à lutter contre le diabète de type 1. En 2000, 7 essais au champ de carotte transgénique ont été réalisés aux États-Unis. Aucune variété de carotte transgénique n'est actuellement commercialisée.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplification végétative	ESSAIS La carotte est la plante modèle pour l'embryogenèse somatique. Par contre, l'application pratique du concept de semence artificielle s'est avérée irréaliste (<i>cf.</i> encadré ci-contre). L'embryogenèse somatique est toutefois utilisée ponctuellement en sélection pour garder des génotypes non reproductibles par voie sexuée et pour cloner certains de ces génotypes en vue d'une évaluation plus précise de leurs valeurs (par exemple, recherche de sources de résistance à des parasites).
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	OUI Il est possible d'obtenir des plantes haploïdes de carotte par culture d'anthers <i>in vitro</i> .
Recours à la stérilité mâle	OUI Deux stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques d'origine nord-américaine sont utilisées : – le type « étamines pétaloïdes » (d'abord appelée « étamines sépaloïdes »). Elle a été découverte en 1953 dans une carotte sauvage. Les étamines sont transformées en pièces pétaloïdes de couleur verte. La sélection a permis une évolution dans la coloration des pétales, ce qui favorise la visite des fleurs par les insectes. Cette stérilité mâle est actuellement utilisée aux États-Unis dans presque 100 % des variétés hybrides et en Europe dans environ 20 % des variétés hybrides ; – le type « anthères brunes » . Elle a été découverte dans les années 1920 dans la variété 'Tendersweet'. Les anthères sont recroquevillées et les cellules-mères des grains de pollen ne dépassent pas le stade tétrade. Elle est actuellement utilisée en Europe dans environ 80 % des variétés hybrides.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires sont utilisés, entre autres, pour la gestion des ressources génétiques.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	La sélection conservatrice est utilisée pour le maintien d'un certain nombre de populations encore utilisées. La sélection maternelle est utilisée pour obtenir des lignées homogènes. La carotte supporte peu de générations d'autofécondation (3 à 5) du fait d'une grande sensibilité à la consanguinité.
Types variétaux	Variété population. C'est le type variétal des variétés anciennes. Ces variétés étant génétiquement hétérogènes, les sélectionneurs, chacun selon leurs propres critères, ont obtenu de nombreuses races, ayant chacune des caractéristiques propres pour leur aptitude culturale et pour la morphologie de la racine : – les variétés de carotte pour l'industrie dans les mélanges « petit pois/carotte » sont toutes de ce type. Elles sont semées très denses nécessitant donc l'usage d'une quantité importante de semences. Les semences hybrides sont trop onéreuses dans ce type de culture ; – les variétés de carotte fourragère sont aussi des variétés populations. Variété hybride. La structure hybride apporte vigueur, précocité et homogénéité et a permis de transformer cette espèce en plante de culture de plein champ protégée ou non et entièrement mécanisée.

Les semences artificielles : un rêve encore inaccessible

Basé sur la théorie de T. Schwann et M. Schleiden et prévu par G. Haberlandt dès 1902, il a fallu attendre 1958 pour que le phénomène de totipotence cellulaire soit vérifié chez la carotte sauvage. Des cellules isolées à partir d'explants pluricellulaires peuvent se diviser en milieu liquide agité *in vitro* et donner naissance à des embryons somatiques, eux-mêmes capables d'évoluer en plantules. La capacité de reproduire un nouvel individu est donc une aptitude fondamentale de la cellule végétative et non l'exclusivité du zygote. L'aptitude remarquable de la carotte à l'embryogenèse somatique en a fait une espèce modèle pour de nombreuses études fondamentales sur les causes et les mécanismes de l'embryogenèse végétale.

La possibilité de produire en grande quantité des embryons dans un faible volume de milieu de culture a suscité de nombreux espoirs dans les années 1990 : avec un ou deux bio-réacteurs, il était théoriquement possible de produire assez d'embryons pour créer des semences pour toute la planète. C'est ainsi qu'est né le concept de « semence artificielle », semence qui est constituée d'un embryon somatique emballé dans une bille d'agar-agar contenant un produit permettant de bloquer temporairement l'évolution de l'embryon. L'embryon doit, ensuite, être capable de se remettre à croître lorsqu'il est replacé en conditions d'humidité favorables. Mais, de nombreux problèmes sont apparus, parmi eux, la faible fréquence de développement des embryons en plantules, le manque de synchronisme des populations d'embryons et les risques de non conformité génétique. Dans le cas de la carotte, espèce où la dominance du méristème racinaire est fondamentale, l'arrêt de la germination perturbe celle-ci, ce qui se traduit ensuite lors du redémarrage de la germination, par une racine fourchue. Devant l'impossibilité de résoudre ces problèmes, il n'y a pas eu finalement d'application pratique, à grande échelle, chez la carotte. (Signalons que si le concept de semence artificielle n'a été concrétisé que pour la production de semences d'un nombre restreint d'essences forestières au Canada, par contre l'embryogenèse somatique est utilisée pour la production massive de plantules de caféier, de luzerne et de palmier à huile).

Perspectives d'amélioration

Il paraît tout d'abord nécessaire de poursuivre les recherches de résistances génétiques aux principaux bio-agresseurs de la carotte : c'est une facilité de culture pour le producteur en même temps qu'une garantie d'un produit plus sain pour le consommateur. Il paraît aussi important de renforcer l'atout nutritionnel de la carotte. Par ailleurs, la qualité nutritionnelle de la carotte n'est certainement pas due qu'à ses carotènes. Il faudra sans doute prendre en compte d'autres nutriments.

L'amélioration de cette espèce devra aussi suivre les tendances récentes de la consommation : recherche de produits faciles à consommer (quels seront les apports de la génétique et des procédés industriels de transformation ?), attrait vers des produits nouveaux (carottes de couleur inhabituelle : violette, jaune, rose), amélioration de la qualité gustative, etc.

La diversité paraît grande chez l'espèce *Daucus carota* : les croisements classiques devraient permettre d'associer la plupart des caractéristiques recherchées. Dans les années qui viennent, les techniques de marquage moléculaire (de gènes importants chez *Daucus carota*) permettront très vraisemblablement une meilleure connaissance de l'hérédité des caractères et une plus grande efficacité dans la création de variétés nouvelles.

Caractères à améliorer

Résistance aux bio-agresseurs. C'est certainement un des plus grands problèmes actuellement. En effet, peu de résistances ont été introduites et, de plus, de nombreux produits phytosanitaires sont sur le point de voir leur utilisation limitée et même interdite pour des raisons de protection de l'environnement et de sécurité sanitaire. Il serait donc très intéressant d'obtenir des résistances génétiques à différents bio-agresseurs :

Mouche de la carotte (*Psila rosae*). C'est le parasite qui cause le plus de dégâts, la larve creusant des galeries dans la racine. Des travaux conduits au Royaume-Uni ont mis en évidence des différences notables de sensibilité dans le matériel cultivé et des niveaux de résistances plus élevés dans d'autres espèces de *Daucus* (notamment *D. capillifolius*, qui se croise facilement avec la carotte cultivée).

Maladie de la tache ou cavity spot (*Pythium violae* et *P. sulcatum*). Cette maladie très importante sur la carotte est, à présent, plus ou moins bien contrôlée grâce à un fongicide, à des précautions culturales et aussi à la tolérance que présentent certaines variétés actuelles. Mais, il n'est pas certain que certains symptômes de tache observés soient toujours dus aux *Pythium*.

Nématodes (*Heterodera carotae* mais aussi *Meloidogyne spp.* et *Pratylenchus spp.*). Ils causent des dégâts importants dans les cultures de carotte en générant des racines fourchues, avec des nodosités ou un chevelu racinaire très développé. Des recherches de résistances à certains *Meloidogyne* et à *Heterodera carotae* sont en cours.

Alternariose. La recherche de nouvelles résistances à cette maladie est en cours.

Qualité nutritionnelle. La carotte est un légume très riche en provitamine A ou carotène. Dans le monde, de fortes carences en vitamine A sont observées, se traduisant par des cécités, des cancers et des problèmes cardio-vasculaires. Il existe du matériel à haute teneur en carotène (*High Carotene Mass*, HCM) contenant 400 à 500 mg par kg de poids frais contre 80 à 160 mg pour les plus classiques.

Qualité organoleptique. La teneur en sucres solubles varie de 2,5 à 14 % (du poids frais) chez la carotte, mais se situe le plus souvent entre 4 et 8 %. Dans la plupart du matériel (à l'exception de mutants rares), les sucres réducteurs (glucose et fructose) sont majoritaires à maturité et représentent environ 50 à 90 % des sucres solubles (en fonction de l'environnement et du matériel génétique). Glucose et fructose sont en proportions équimolaires. La teneur en sucres serait intéressante à améliorer car, en plus de jouer un rôle important dans la conservation, elle améliore aussi les qualités organoleptiques de la carotte. Les premières variétés de carotte cultivées contenaient un taux élevé de terpénoïdes volatils donnant une saveur désagréable. Une contre-sélection a été effectuée et les populations et hybrides de type « Nantaise » actuels en contiennent peu.

Diversification des systèmes de stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques. L'utilisation, à grande échelle en Europe, d'un seul cytoplasme pourrait révéler une sensibilité à certains parasites ou à certaines conditions pédoclimatiques. La recherche dans les populations anciennes de nouveaux cytoplasmes mâles stériles doit donc être activement poursuivie.

Techniques à développer

Chez une espèce bisannuelle comme la carotte cultivée où la sélection est lente, la sélection assistée par marqueurs apporterait un grand avantage.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1975, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique particulière de variétés hybrides de carotte.

1975, modification, par arrêté ministériel, du catalogue officiel des plantes potagères par l'ouverture d'une liste des variétés de plantes potagères admises à certification.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre annexe variétés anciennes pour jardiniers amateurs, instituant un règlement technique annexe d'inscription.

En 2003, 99 variétés de carotte potagère et 2 variétés de carotte fourragère étaient inscrites au catalogue officiel français et 596 au catalogue européen qui

est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Cette même année, quatre variétés de carotte potagère étaient inscrites sur la liste des variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation jusqu'en décembre 2004, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 38 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. À l'issue de ces 2 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Concernant les « races », « sélections » ou « maintenances », la directive de commercialisation prévoit que pour des variétés anciennes, inscrites avant juin 1970, il est possible au niveau de la commercialisation de faire référence à une sélection conservatrice. Ainsi, dans le cas de la carotte 'Nantaise' race 'Tip-Top', la race ne doit pas se distinguer nettement de la variété, elle doit se situer dans le domaine de définition de la variété. Dans le catalogue officiel français, une race peut être acceptée si dans un contrôle de type contrôle SOC, elle est classée conforme à la variété. Une race peut donc (mais ce n'est pas obligatoire), se différencier légèrement de la variété d'origine, par exemple, par sa légère précocité ou sa racine légèrement plus longue. Une race doit donc rester conforme pour les caractéristiques principales à celles de la variété d'origine.

Pour en savoir plus

APRIFEL, 1999. La carotte. Dans : *Fiches nutritionnelles de référence*, 2 p.

Banga O., 1962. *Main types of the western carotene carrot and their origin*. Tjeenk Willink, Zwolle, 153 p.

Bonnet A., 1975. La culture d'hybride de carottes en France. *PHM*, 159, 29-33.

Bonnet A., 1983. *Daucus carota* ssp. *dentatus* Bertol., géniteur de résistance à l'oïdium pour l'amélioration de la carotte cultivée. *Agronomie*, 3(1), 33-38.

Bonnet A. et Pécaut P., 1978. Stérilité mâle et obtention de variétés hybrides de carotte (*Daucus carota* L.) adaptées aux besoins français. *C. R. Acad. Agric.*, 64, 92-100.

- Bradeen J.M., Bach I.C., Briard M., Le Clerc V., Grzebelus D., Senalik D.A. et Simon P.W.**, 2002. Molecular diversity analysis of cultivated carrot (*Daucus carota* L.) and wild *Daucus* populations reveals a genetically nonstructured composition. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 127 (3), 383-391.
- Bradeen J.M. et Simon P.W.**, 1998. Conversion of an AFLP fragment linked to the carrot Y2 locus to a simple, codominant, PCR-based marker form. *Theor. Appl. Genet.*, 97 (5/6), 960-967.
- Buret P. et Herard R.**, 1976. Carotte : les premiers hybrides F₁ répondant au marché français et européen. *PHM*, 169, 49-67.
- Chaux C. et Foury C.**, 1998. Carotte. Dans : *Productions légumières*. Tec & Doc, Paris, tome 2, 201-236.
- Droge W., Broer I. et Puhler A.**, 1992. Transgenic plants containing the phosphinothricin-N-acetyltransferase gene metabolize the herbicide L-phosphinothricin (glufosinate) differently from untransformed plants. *Planta*, 187 (1), 142-151.
- Foury C.**, 2003. Carottes et panais. Dans : *Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 126-147.
- Heywood V.H.**, 1983. Relationships and evolution in the *Daucus carota* complex. *Israel J. Bot.*, 32, 51-65.
- Laumonnier R.**, 1963. La carotte. Dans : *Cultures maraîchères*. Éditions J.B. Baillièrre et fils, Paris, 197-221.
- Margara J.**, 1982. *Bases de la multiplication végétative, les méristèmes et l'organogénèse*. INRA Éditions, Paris, 262 p.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies de la carotte et du fenouil de Florence. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 324-345.
- Noé F., Mercier V. et Briard M.**, 2001. Les ressources génétiques de la carotte s'organisent.... *PHM*, 430, 36-38.
- Péron J.-Y.**, 1999. La carotte. Dans : *Productions légumières*. Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 174-182.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Porceddu A., Falorni A., Ferradini N., Cosentino A., Calcinaro F., Faleri C., Cresti M., Lorenzetti F., Brunetti P. et Pezzoti M.**, 1999. Transgenic plants expressing human glutamic acid decarboxylase (GAD65), a major autoantigen in insulin-dependent diabetes mellitus. *Mol. Breed.*, 5 (6), 553-560.
- Punja Z.K. et Raharjo S.H.T.**, 1996. Response of transgenic cucumber and carrot plants expressing different chitinase enzymes to inoculation with fungal pathogens. *Plant Dis.*, 8 (9), 999-1005.
- Simon P.W. et Strandberg J.O.**, 1998. Diallel analysis of resistance in carrot to *Alternaria* leaf blight. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 123(3), 412-415.
- Steward F. C., Mapes M. O. et Mears K.**, 1958. Growth and organized development of cultured cells. *Am. J. Bot.*, 45, 705-708.
- Villeneuve F.**, 1999. La carotte. Dans : *Références. Technologie des légumes*. Coordinateurs, Y. Tirilly et C.M. Bourgeois, Éditions Tec & Doc, Paris, 45-63.
- Villeneuve F. et Leteinturier J.**, 1992. *La carotte, guide pratique*. Éditions Ctifl, Paris, tome 1, 229 p.
- Villeneuve F. et Leteinturier J.**, 1992. *La carotte, état des connaissances*. Éditions Ctifl, Paris, tome 2, 227 p.
- Wake H., Umetsu H. et Matsunaga T.**, 1994. Somatic embryogenesis and artificial seed in carrot (*Daucus carota* L.), 31, 170-182.
- Welch I.C. et Grimball E.L. Jr.**, 1947. Male sterility in the carrot. *Science*, 106 (12), 594.

Le cassissier

Ribes nigrum L. ($2n = 2x = 16$)
(Saxifragacées)

Présentation de l'espèce

Le cassissier (encore appelé groseillier noir), *Ribes nigrum* L., est originaire des régions tempérées froides d'Europe et de l'Asie centrale et du Nord. Ignoré jusqu'à la Renaissance, sa culture a commencé seulement à se répandre au XVIII^e siècle. Le cassis a alors été utilisé avant tout pour ses qualités thérapeutiques, comme substitut d'autres substances de goût fort et de couleur sombre (par exemple substitut de la casse, pulpe purgative extraite de la gousse cylindrique du cassier, *Cassia fistula* L., arbre originaire des Indes et longtemps utilisé dans la pharmacopée). L'abbé de Montmaran a écrit, à cette époque, un *Traité du cassis, contenant sa culture, ses vertus et ses propriétés, sa composition et les effets merveilleux qu'il produit dans une infinité de maladies*.

Jusqu'en 1840, le cassissier était cultivé par les particuliers dans leurs jardins pour l'usage domestique des fruits et des feuilles et parfois la production familiale de ratafia de cassis, l'ancêtre de la liqueur de cassis. Puis devant le succès du ratafia à Paris, D. Lagoute, cafetier dijonnais, décida de produire de la liqueur de cassis d'un goût supérieur à celui du ratafia. Pour fournir des baies en quantité suffisante, des cassissiers furent plantés avec la vigne dans la région des Hautes-Côtes de Dijon (Côte-d'Or). Suite à la crise phylloxérique, les plants de cassissier ont été installés en plantations distinctes. Enfin, un autre abbé, le chanoine F. Kir, maire et député de Dijon de 1945 à 1968, a beaucoup contribué à populariser le cassis sous forme de liqueur en donnant son nom à un apéritif.

Le cassissier est une espèce allogame pérenne, multipliée végétativement par bouturage. *R. nigrum* peut se croiser avec d'autres espèces notamment d'origine nord-américaine, *R. divaricatum* Dougl. et *R. niveum* Lindl.

La variabilité génétique du cassissier a été récemment évaluée par marquage moléculaire. Il apparaît que seulement 26 % des marqueurs RAPD sont polymorphes, ce qui est le signe d'une assez faible diversité au sein de l'espèce.

En France, la collection de ressources génétiques a été récemment transférée au Conservatoire botanique national du Massif central à Chavaniac-Lafayette (Haute-Loire), qui assure la gestion patrimoniale, un double de sécurité restant implanté à l'INRA d'Angers (Maine-et-Loire).

Production et utilisation

Deux produits sont récoltés : le cassis et les bourgeons. Le cassis est un fruit, une baie noire. Les baies sont disposées en grappes lâches et pendantes.

La production mondiale de cassis peut être estimée à 100-150 000 tonnes, les plus importants producteurs étant la Pologne et la Russie. La production française a été de 11 200 tonnes en 2004 (données Agreste).

Le cassissier est un arbuste qui a de multiples usages :

- les baies de cassis sont consommées sous forme de fruit frais. Elles sont aussi transformées en confiture, pâte de fruit, jus, concentré, purée, sorbet, ou en crème et liqueur (« crème de cassis »). En industrie pharmaceutique, des anthocyanosides sont extraits des baies. Ces produits servent à la prévention des maladies circulatoires. Les baies sont également très riches en vitamine C ;
- les bourgeons et les feuilles sont très riches en glandes qui renferment une huile essentielle au parfum caractéristique de l'espèce. Cette huile essentielle est utilisée en aromatique alimentaire et en parfumerie. Ainsi, depuis 1981, les bourgeons récoltés en hiver et destinés aux parfumeurs de Grasse (Alpes-Maritimes) constituent un nouveau marché ;
- les bourgeons sont également utilisés en homéopathie, car ils possèdent des propriétés antiallergiques. Les feuilles sont aussi recherchées en herboristerie pour leur propriété antirhumatismale. Elles entrent, par ailleurs, dans la préparation de certains thés aromatisés ;
- enfin, à partir des graines, on peut extraire une huile qui est très riche en acide γ -linoléique.

Histoire des variétés cultivées en France

1900, '**Noir de Bourgogne**', variété locale traditionnelle qui a fait l'objet d'un important travail de sélection clonale depuis 1964 par l'INRA. Elle est auto-stérile et présente une excellente qualité aromatique tant au niveau du bourgeon utilisé en parfumerie qu'au niveau du fruit recherché et apprécié en liquorerie. C'est une variété de moyenne saison, c'est-à-dire que ses fruits sont mûrs pendant la deuxième décennie de juillet. Elle s'est révélée remarquablement adaptée à la récolte mécanique. La sélection 'N53-16' (INRA / Ctifl), de très bonne productivité, est le clone le plus multiplié par la profession.

1900, '**Royal de Naples**', variété traditionnelle auto-stérile, associée historiquement à la précédente, car elle représente son complément technologique (forte acidité, forte teneur en vitamine C et intensité maximale de coloration) pour

obtenir un mélange de haute qualité qui a contribué à la réputation du cassis de Dijon. Elle a aussi fait l'objet d'un important travail de sélection clonale depuis 1964 par l'INRA, cette sélection clonale ayant permis de retenir les clones les plus productifs et de bon état sanitaire. C'est une variété de moyenne saison.

1978, '**Blackdown**' (université de Bristol, Long Ashton, Royaume-Uni), variété très productive et autofertile. Par contre, les fruits sont peu aromatiques et elle est sensible à l'oïdium et à l'anthracnose. C'est la variété la plus cultivée en France. C'est une variété tardive, c'est-à-dire que ses fruits sont mûrs fin juillet-début août.

1979, '**Burga**' (INRA, France), variété obtenue, par mutagenèse, à partir de 'Noir de Bourgogne' et se caractérisant par une maturité plus précoce (ses fruits sont mûrs pendant la première décade de juillet) que celle de cette dernière et une bonne aptitude à la récolte mécanique. Elle est partiellement autostérile. La qualité aromatique de ses fruits est excellente.

1982, '**Delindmoi**' (Delbard Georges, France), variété autostérile très productive à grosses baies. Elle est résistante à l'oïdium. Elle est surtout cultivée par les jardiniers amateurs avec une maturité à la mi-juillet.

1987, '**Andega**' (INRA / ANPPE, France) est une variété alliant adaptation aux hivers doux, autofertilité, grande qualité aromatique des fruits et résistance à l'oïdium. Cette variété de moyenne saison est très appréciée pour la fabrication de liqueur.

1987, '**Tifon**' (INRA / ANPPE, France), variété autofertile productive et résistante à l'oïdium. C'est une variété précoce (c'est-à-dire que ses fruits sont mûrs pendant la première décade de juillet). Ses fruits sont de qualité aromatique moyenne.

1987, '**Troll**' (INRA / ANPPE, France), variété autofertile, très productive et peu sensible à l'oïdium. Ses fruits, de qualité aromatique moyenne, sont bien adaptés à la fabrication de jus et de confiture. C'est une variété précoce.

2000, '**Titania**' (Station de recherches de Bålgård, Suède), variété dont les baies grandes et fermes sont adaptées à la récolte mécanique. Elle est résistante à l'oïdium et à la rouille (*Cronartium ribicola*) et bien adaptée à la production de jus. La maturité se situe du début à la mi-juillet.

En 2004, deux variétés ont été proposées à l'inscription au catalogue officiel français, l'étude des épreuves DHS étant conduite en Allemagne par le *Bundessortnamt* :

– '**Andelène**' (N380) (INRA, France), variété productive, tolérante à l'oïdium, peu sensible à l'anthracnose et au phytophte. Sa floraison tardive limite les risques de gelée. Sa qualité technologique est comparable à celle d'Andega ;

– '**Andorine**' (N261) (INRA, France), variété très productive à floraison précoce à moyenne. Elle est tolérante à l'oïdium et peu sensible à l'anthracnose et au phytophte. Sa qualité technologique est proche de celle de 'Blackdown'.

Remarque. Des hybridations intraspécifiques avec des variétés suédoises notamment et interspécifiques ont permis d'accroître la variabilité. C'est le cas, en particulier, des travaux conduits à l'INRA d'Angers (Maine-et-Loire) pour une adaptation aux hivers doux avec de faibles besoins en froid et l'obtention d'un débourrement non erratique des bourgeons au printemps.

Regard sur 50 ans de sélection

Une sélection clonale a permis d'assurer la diffusion de plants des variétés anciennes et des nouvelles obtentions INRA. Les programmes de recherche, peu nombreux sur le cassissier, ont conduit à la diffusion de variétés autofertiles, résistantes à l'oïdium et produisant des fruits de bonne qualité aromatique.

Le cassissier fait l'objet de travaux d'amélioration au Royaume-Uni (*Scottish Crop Research Institute*, SCRI, à Dundee, Écosse), en Pologne (Station de Skiernewice), en Hongrie (Station de Fertöd) et en Nouvelle-Zélande.

Caractères importants améliorés

Résistance à l'oïdium. Cette maladie est causée par un champignon (*Sphaerotheca mors-uvae*). Le croisement avec des variétés suédoises ('Sunderbyn II', 'Matkakoski' et 'Öjebyn') a permis d'introduire un allèle dominant de résistance. Ces résistances ne sont pas, jusqu'à présent, contournées. D'autres gènes de résistance pourraient éventuellement être transférés par croisements interspécifiques avec notamment *R. dikuscha* Fisch., *R. hudsonianum* Rich., *R. petiolare* Dougl., *R. pauciflorum* Turcz. ex Pojark, etc.

Qualité. Elle est évaluée par 3 caractéristiques chimiques du jus obtenu après broyage des baies et centrifugation : l'acidité totale mesurée par titrimétrie à la soude N/10, la teneur en matière sèche mesurée par l'indice réfractométrique (IR) et l'intensité et la stabilité de coloration des jus mesurées par colorimétrie.

Autofertilité. Les variétés, les plus couramment cultivées jusqu'à la fin des années 1970, avaient un rendement médiocre malgré leur haute valeur aromatique. Les études menées ont montré que ces faibles performances étaient essentiellement dues à des problèmes de coulure d'autant plus fréquents et accentués que la variété était plus autostérile. La plantation de variétés pollinisatrices, garantissant un apport de pollen étranger (transporté par des insectes) avec l'installation de ruches d'abeilles permet d'assurer une bonne production. La création de variétés autofertiles apporte une autre solution, plus simple.

Richesse en huiles essentielles. Des variétés produisant des bourgeons très riches en huiles essentielles ont été récemment sélectionnées. Elles vont être exploitées par la pharmacopée et l'industrie du parfum.

Adaptation à la récolte mécanique. Certaines variétés se sont avérées bien adaptées à la récolte mécanique grâce à une architecture spécifique de la plante.

Ainsi, un port érigé, une grande vigueur de la plante et une faible longueur des grappes, accompagnés d'un mode de conduite approprié sont autant d'éléments favorables à la récolte mécanique à l'aide de machines à vendanger.

Adaptation aux hivers doux. Le cassissier est résistant au froid. Par contre, le programme INRA a porté sur l'adaptation aux hivers doux (Pays de Loire) en sélectionnant des plantes ayant de faibles besoins en froid pour l'induction florale et présentant un débourrement régulier des bourgeons.

Précocité. La précocité permet d'allonger la période de récolte. Ainsi, avec la variété obtenue par mutagenèse 'Burga', en moyenne, un gain de 8 jours est obtenu par rapport au clone d'origine 'Noir de Bourgogne'.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	NON On trouve, avec une très faible fréquence, des cassissiers à fruit blanc. Ils sont sans intérêt agronomique, étant donné la faible qualité aromatique d'un tel fruit. Dans l'un d'entre eux, une mutation fruit noir a été repérée.
Mutagenèse induite	OUI Des traitements aux rayons γ ont permis d'acquérir une précocité de maturité ('Burga').
Croisements interspécifiques	OUI Des croisements interspécifiques ont été effectués en France de 1960 à 1995. Des résistances à l'oïdium et à l'anthracnose (maladie fongique causée par <i>Gloeosporium ribis</i> ou <i>Pseudopeziza ribis</i>) et au virus de la réversion du cassis transmis par un acarien <i>Cecidophyopsis ribis</i> , ont été introduites par croisements interspécifiques.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS La polyploïdie naturelle est extrêmement rare dans le genre <i>Ribes</i> . L'induction de la polyploïdie a été tentée en utilisant, en particulier, de la colchicine. Les plantes tétraploïdes obtenues ont été croisées avec des plantes diploïdes pour obtenir des plantes triploïdes. Toutefois, il n'existe aucune variété triploïde en culture.
Transgénèse	ESSAIS Des travaux de transgénèse ont débuté au SCRI, mais ne semblent pas avoir été poursuivis. Ils concernaient l'introduction de gènes marqueurs de type <i>NPTII</i> , <i>GUS</i> .
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Le cassissier est multiplié par bouturage horticole. La multiplication végétative <i>in vitro</i> est pratiquée pour la production de boutures des nouvelles variétés, permettant ainsi d'en accélérer la diffusion.

Sélection sanitaire	NON	
		suite...
... suite		
Haploïdisation	AUCUNE	
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE	
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI	Le cassissier est naturellement auto-incompatible. Des variétés auto-fertiles ont été obtenues ('Andega').
Marquage moléculaire	OUI	Des études de biodiversité ont été réalisées à l'aide de marqueurs moléculaires de type ISSR, AFLP et RAPD. Des marqueurs de gènes d'intérêt ont été isolés.
MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX		
Méthodes et schémas de sélection	Hybridation (croisements factoriels)	
Types variétaux	Variété clone	

Perspectives d'amélioration

L'amélioration est peu active en France et l'essentiel des travaux se déroule au Royaume-Uni (Écosse), en Pologne et aux États-Unis.

Caractères à améliorer

Résistance aux bio-agresseurs. Dans plusieurs pays, des résistances à des maladies telles que l'anthracnose ou à des insectes (notamment le puceron jaune, *Cryptomyzus ribis* et le puceron vert, *Aphis grossulariae*) ou à un acarien, le phytopte (*Cecidophyopsis ribis*) ont été introduites dans le cassissier par croisements interspécifiques. En France, la demande actuelle concerne surtout la résistance au phytopte, dont l'importance s'est accrue ces dernières années. Ce minuscule acarien induit le boursoufflement des bourgeons (« gros bourgeons ») au stade du débourrement. Il est également responsable de la transmission d'un virus qui provoque une maladie grave, la réversion du cassis. Il serait intéressant d'introduire ces résistances dans des variétés adaptées aux conditions pédo-climatiques françaises.

Teneur en vitamines. Le cassis est riche en vitamines C et E. Un programme d'amélioration du cassissier, conduit en Écosse par une entreprise privée, a pour but de créer des variétés très riches en vitamines et polyphénols.

Techniques à développer

La carte génétique de *R. nigrum*, basée sur des marqueurs AFLP et microsatellites est en cours au SCRI.

Inscription et protection des variétés en France

1966, ouverture, par arrêté ministériel, de la liste cassissier dans le catalogue officiel des arbres fruitiers.

En 2003, 16 variétés étaient inscrites au catalogue français. Dans les épreuves DHS, autrefois conduites à l'INRA et désormais par le *Bundessortenamt* en Allemagne, 23 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 cycles végétatifs suivis de 2 cycles de production significative de fruits. À l'issue de cette période, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée des plantes maintenues en collection de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

Anderson M.M., 1972. Resistance to blackcurrant leaf spot (*Pseudopeziza ribis*) in crosses between *Ribes dikuscha* and *R. nigrum*. *Euphytica*, 21, 510-517.

APRIFEL, 1999. Le cassis. Dans : *Fruits et légumes frais : fiches nutritionnelles de référence*. Éditions APRIFEL, Paris, 2 p.

Boidron V., Guenin A.-M. et Laligant S., 1992. Le cassis de Dijon. Dans : *Cassis, oignons, cerises, cornichons, 4 produits des terroirs bourguignons*. Édition Écomusée de la Bresse bourguignonne, Pierre-de-Bresse, 1-40.

Brennan R.M., 1996. Currants and gooseberries. Dans : *Fruit Breeding*, vol. II, *Vine and small fruit crops*, J. Janick et J. N. Moore éd., John Wiley, New-York, 191-295.

Brennan R.M. et Gordon S.L., 2002. Future Perspectives in Blackcurrant Breeding. *Acta Hort.*, 585, 39-46.

Charnock J.S., Crozier G.L. et Woodhouse J., 1994. Gamma-linolenic acid, black currant seed and evening primrose oil in the prevention of cardiac arrhythmia in aged rats. *Nutr. Res.*, 14 (7), 1089-1099.

Dosba F. et Lespinnasse Y., 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.

Gautier M., 2001. Cassissier et groseiller à grappes. Dans : *La culture fruitière*, volume 2, *Les productions fruitières*. Tec & Doc, Paris, 509-539.

Graham J. et Mc Nicol R.J., 1991. Regeneration and transformation of *Ribes*. *Plant Cell, Tissue and Organ Cult.*, 24, 91-95.

Jennings D.L., Anderson M.M. et Brennan R.M., 1987. Raspberry and Blackcurrant Breeding. Dans : *Improving vegetatively propagated crops*. A.J. Abbott et. R.K. Atkin, éd., Academic Press, Londres, 135-147.

Keep E., 1977. North European cultivars as donors of resistance to american gooseberry mildew in blackcurrant breeding. *Euphytica*, 26, 817-823.

Keep E., 1985. Resistance to the gall mite and american gooseberry mildew in blackcurrant in relation to season of leafing out. *Euphytica*, 34, 509-519.

- Lanham P.G. et Brennan R.M.**, 2001. Genetic diversity in *Ribes*. *Acta Hortic.*, 546, 135-137.
- Lantin B.**, 1982. Le cassis, variétés, techniques culturales. *Bull. Petits Fruits*, 20, 19-25.
- Lantin B.**, 1985. Le point sur une culture peu connue : culture de cassissiers pour la production de bourgeons. *Bull. Petits Fruits*, 27, 23-27.
- Lantin B.**, 1988. L'amélioration génétique du cassis. Objectifs, méthodes, résultats, perspectives. *Bull. Petits Fruits*, 32, 17-24.
- Mussillon P., Hemmerlé G., Grégoire S. et Lantin B.**, 1982. Observation sur la coulure du cassis. *Bull. Petits Fruits*, 21, 7-21.
- Trillot M., Boré J.-M., Dupin J.-P. et Massardier P.**, 2001. *Le cassis*. Éditions Ctifl, Paris, 169 p.

La chicorée endive ou witloof

Cichorium intybus L. var. *foliosum* Hegi ($2n = 2x = 18$)
(Astéracées ou Composées)

Présentation du cultigroupe

Les feuilles vertes de chicorée sauvage (*Cichorium intybus* L.) ont depuis très longtemps été récoltées, cueillies dans les prés ou les champs et consommées en salade ou même comme médicaments dans la zone méditerranéenne. En France, une alternative à la salade verte est signalée pour la première fois en 1610-1615, dans le livre de C. Mollet *Théâtre des plans et jardinages* : « Étiolées, les feuilles de chicorée sauvage sont excellentes en salade », dit-il. En Europe du Nord, on consommait, sous forme étiolée, comme salade d'hiver, de la chicorée sauvage ou de la barbe de capucin, un des cultigrupes de la sous-espèce chicorée à feuilles (*Cichorium intybus* var. *foliosum* Hegi), et ceci malgré leur goût assez amer.

La chicorée a d'abord été cultivée pour ses propriétés médicinales (cf. p. 219). Puis, la culture de la barbe de capucin pour la production de salade étiolée d'hiver s'est développée, en particulier à la périphérie des villes du nord de la France. En 1853, l'utilisation accidentelle de semences de chicorée industrielle ou à racines (*Cichorium intybus* L. var. *sativum* (Bisch.) Janch.) conduisit à un produit de meilleure qualité (mais toujours non pommé) et cette nouvelle sorte de barbe de capucin fut aussitôt adoptée et remplaça le type original. Cette production devint très importante pendant la deuxième partie du XIX^e siècle, en particulier dans la banlieue parisienne pour approvisionner les marchés de Paris.

La chicorée endive ou witloof (ou chicorée de Bruxelles), autre cultigroupe de la sous-espèce *C. i.* var. *foliosum*, est née en Belgique vers 1850. M. Bresiers, jardinier en chef du jardin botanique de Bruxelles utilisait les souterrains du jardin pour produire des salades d'hiver. Il remarqua que si les racines de chicorée étaient recouvertes de terre, il obtenait des chicons, sortes de salade étiolée, pommée et relativement serrée. D'abord tenue secrète, la technique de production de chicons se développa rapidement dans la région de Bruxelles et

la Belgique devint vite exportatrice. L'endive a été introduite en France par Henri de Vilmorin qui l'a présentée, pour la première fois en 1875, à la Société nationale d'horticulture de France. Il a fallu très peu d'années pour que ce nouveau légume soit adopté en France.

L'endive est allogame, bisannuelle et multipliée par semences. La chicorée sauvage, qui appartient à la même espèce que l'endive cultivée, est très répandue, le long des chemins en particulier. Dans le cas des champs destinés à la production d'endive, les possibilités de croisements naturels entre plantes cultivées et plantes sauvages sont limitées car les plantes sont récoltées au stade végétatif. En outre, la sélection a eu pour conséquence de réduire considérablement le nombre de plantes montant à fleurs dans les champs. Par contre, dans le cas des champs destinés à la production de semences, il est nécessaire de couper les plantes sauvages à proximité pour éviter les hybridations avec des plantes sauvages (l'hybridation avec *C. intybus* sauvage est, par exemple, à l'origine d'une augmentation du taux de montée à fleurs, dès la première année).

L'endive est issue de variétés populations de chicorée à torréfier. La base génétique de ce cultigroupe est étroite. Un programme de sauvegarde des ressources génétiques de chicorée a été mis en place par le BRG et le GEVES depuis 1995. Il n'a pas permis de sauver toutes les populations anciennes.

Production et utilisation

Le produit d'abord récolté au champ est une plante en rosette dont on garde la racine avec le bourgeon à son extrémité. L'endive ou chicon, le produit récolté final, est une rosette étiolée de feuilles dressées, imbriquées et formant une pomme, qui résulte du développement du bourgeon apical dominant, à l'abri de la lumière recouvert ou non de terre (dite « terre de couverture »). La nervure médiane de la feuille est très développée et charnue.

La France est devenue le premier producteur mondial au début des années 1960 avec 129 000 tonnes en 1961. Elle l'est restée depuis et sa production était de plus de 230 000 tonnes en 2004. Les autres pays producteurs importants sont la Belgique (80 000 t) et les Pays-Bas (75 000 t). La production mondiale est de 410 000 tonnes (données Celfnord, 2004).

L'endive est un légume essentiellement destiné au marché de frais. L'endive est consommée crue ou cuite.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

1850 environ, '**Chicorée à grosses racines de Bruxelles**', variété population belge issue d'une variété de chicorée à torréfier, la '**Chicorée à grosses racines de Magdebourg**' caractérisée par des feuilles larges entières et dressées.

‘**Campenhout**’, ‘**Hâtive de Malines**’, ‘**Prince Léopold**’, ‘**Tardive d’Anvers**’, exemples parmi les nombreuses populations belges qui ont été utilisées et conservées par sélection massale, notamment en France jusqu’en 1960. Les variétés étaient classées en 3 types principaux : précoce, normal et tardif selon la date de récolte des chicons et liés aux besoins en froid.

‘**Super hâtive Godinette**’ (Goddyn, France), ‘**OK normale**’ (Hoquet, France), ‘**Vilmorin 5**’ (Vilmorin-Andrieux, France) sont des exemples de variétés populations françaises.

Variétés récentes

1972, ‘**Flambor**’ (INRA, France), première variété hybride F₁, basée sur l’utilisation de la compétition pollinique. C’était une variété à cultiver avec terre de couverture, comme toutes les variétés anciennes.

1975, ‘**Zoom**’ (INRA, France), première variété hybride F₁ capable de pommer en absence de terre de couverture, soit avec les racines croissant dans une solution nutritive, donc adaptée au forçage en salle en culture hydroponique. Par ailleurs, elle est capable d’être aussi forcée en pleine terre. Sa polyvalence vis-à-vis de la période de forçage est remarquable.

1985, ‘**Bea**’ (INRA, France / Ctifl, France), variété hybride F₁ appréciée pour la très grande qualité de son chicon (forme bien obtuse, feuilles du pourtour bien appliquées, pas de nécessité d’épluchage après récolte) et sa rusticité, qui lui ont valu réussite commerciale et longévité. Elle a servi de témoin de référence dans de nombreux tests.

1985, ‘**Flash**’ (INRA, France / Ctifl, France), variété hybride F₁ remarquable en raison de son aptitude à être forcée toute l’année, mais exigeante en compétences techniques.

1989, ‘**Mona**’ (Goddyn, France), variété hybride F₁ tolérante à *Phytophthora cryptogea*. Elle sert encore aujourd’hui de témoin de tolérance dans les tests d’infection pratiqués par la Fédération nationale des producteurs d’endive (FNPE).

1989, ‘**Turbo**’ (INRA, France / Ctifl, France), variété hybride F₁ qui a connu un long succès commercial en raison de son rendement et de la qualité de son chicon.

1989, ‘**Rougemont**’ (INRA, France / Ctifl, France), première variété hybride d’endive rouge. Ce fut un échec commercial en raison de sa diffusion prématurée (fixation incomplète des caractères des parents) et d’une préparation insuffisante du lancement de ce nouveau produit.

1993, ‘**Carla**’ (Hoquet, France) variété hybride d’endive rouge qui a pris le relais de ‘Rougemont’.

1996, ‘**Eurêka**’ (Graines Hoquet, France), première variété hybride F₁ possédant une résistance à un herbicide (chlorsulfuron), obtenue par sélection cellulaire. Le désherbage qui est un poste important, est ainsi beaucoup mieux contrôlé.

1999, **'Isatis'** (INRA, France / Ctifl, France), première variété hybride de chicorée rouge à feuilles à forcer (endigia®). Elle résulte du croisement entre une chicorée chioggia (chicorée italienne) et une endive rouge. Le parent chicorée chioggia est multiplié *in vitro*. Son développement est assuré, dans le cadre de la marque Carmine®, par la profession endivière (FNPE et Section nationale endive des groupements de producteurs).

2000, **'Alliance'** (Momont et Fils, France), variété hybride F₁ se distinguant par un très bon comportement vis-à-vis des maladies et un bon rendement obtenu avec des chicons d'un calibre moyen. Ceci répond à la demande de certains consommateurs qui ne souhaitent plus un trop gros calibre de chicon.

2000, **'Ermine'** (Vilmorin, France) première variété 100 % hybride F₁ grâce à l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/tournesol « Desprez ».

2001, **'Montblanc'** (Graines Hoquet, France), première variété 100 % hybride F₁, associant l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/tournesol « Desprez », et la résistance à un herbicide (chlorsulfuron), obtenue par sélection cellulaire.

Remarque. Le passage de la culture en pleine terre à la culture en substrat, puis hydroponique en salle de forçage, a entraîné l'abandon des variétés populations qui nécessitent de la terre de couverture pour former des chicons pommés au profit des variétés hybrides sélectionnées pour la culture hydroponique. Ce changement important dans le mode de production a donc correspondu à une relative baisse de la variabilité utilisée.

Regard sur 50 ans de sélection

C'est un ensemble de travaux de recherches fondamentales et appliquées dans les domaines de la sélection, de la physiologie et de la phytotechnie, menés conjointement par l'INRA, le Ctifl, l'université de Paris VI, en relation avec la FNPE qui a conduit à des changements radicaux à toutes les étapes de la production de l'endive.

La sélection de plantes capables de former une pomme (c'est-à-dire un chicon bien fermé) en conditions expérimentales sans terre de couverture a permis de montrer qu'il était possible de supprimer la couverture de terre qui recouvrait jusque-là la culture. Puis, des essais de culture de racines de ce même type de plantes, trempant dans une solution nutritive, dans une salle obscure (au lieu d'une plantation dans la terre en plein air) ont été tentés. Ils ont permis de montrer qu'on pouvait obtenir un chicon de qualité dans ces nouvelles conditions. La sélection de lignées, puis d'hybrides F₁, a conduit à l'obtention d'un matériel homogène (et productif) diffusé à partir des années 1980. Ceci a permis d'établir un mode de conduite précis et d'industrialiser la production.

La production de semences des variétés hybrides F_1 a d'abord été basée sur la compétition pollinique. L'introduction de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Desprez » à partir de la chicorée industrielle permet désormais de disposer de variétés F_1 100 % hybrides.

Des travaux de sélection sont également menés aux Pays-Bas et en Belgique.

Caractères importants améliorés

Homogénéité. Les variétés populations utilisées avant les premiers hybrides F_1 étaient très hétérogènes. Cette hétérogénéité s'exprimait, notamment, lors du forçage par l'obtention de chicons de différentes tailles, formes et fermetés. Environ 50 % de la récolte était d'assez mauvaise qualité. Pour améliorer l'homogénéité, la première solution retenue a été de créer des variétés lignées pures, mais leur rendement n'était pas suffisant en raison de la consanguinité. La solution finalement adoptée pour ce cultigroupe a été la variété hybride F_1 qui résulte du croisement entre deux lignées pures, alliant homogénéité et rendement suffisant.

Productivité. La quantité de chicons obtenue par hectare est passée de 8 t en 1960 à environ 15-16 t en 2000.

Mode de culture. Les méthodes adoptées pour répondre aux contraintes de la sélection ont été transposées à la production (*cf.* encadré p. 212). Le passage en salle de forçage a eu de nombreux impacts sur la diminution de la pénibilité du travail. En effet, jusqu'alors, un certain nombre d'étapes (mise en place des couches, plantation des racines, récolte des chicons, entretien du chauffage jour et nuit,...) étaient effectuées en hiver en plein air. Les étapes de lavage et d'épluchage sont aussi évitées. Ce changement de mode de culture a également eu un fort impact sur le prix de revient de l'endive puisque la part du coût de la main-d'œuvre est passée de 60 à 30-35 % environ.

Aptitude à pommer sans terre de couverture. Ce caractère, qui permet d'éviter de recouvrir de terre les racines avant forçage, apporte une grande simplification dans la conduite de la culture. Repéré dans une population au cours d'essais en sélection, il a été ensuite introduit systématiquement dans tout le matériel génétique et toutes les variétés récentes le possèdent.

Tolérance à l'axe brun. L'axe brun est un accident physiologique qui apparaît, en relation avec la mobilisation du calcium au cours du développement du chicon pendant le forçage. La tolérance à l'axe brun a une composante génétique dont on a tiré profit.

Goût. Le chicon présente une certaine amertume due à la présence de lactucine et de lactucopictine. La sélection a permis de limiter l'amertume et la plupart des variétés récentes ont un goût plus doux (même trop doux, au dire de certains).

Étalement de la période de production. Proposer au consommateur des endives toute l'année est maintenant possible, grâce à des variétés adaptées à de larges périodes de forçage, à une gamme variétale élargie couvrant les périodes extrêmes et à une meilleure maîtrise de la technique de conservation de longue durée des racines (conservation à -1°C).

Diversification des produits. Les croisements entre les nombreux cultigrupes de l'espèce *C. intybus* sont possibles. Ils ont permis d'obtenir deux nouveaux produits : l'endive rouge et la chicorée rouge à larges feuilles à forcer. Des croisements entre *C. intybus* et *C. endivia* L. (chicorée frisée et scarole) ont pu être réalisés récemment, ce qui ouvre la possibilité de sélectionner notamment des types chiorées frisées/scaroles pour la culture en salle de forçage.

Une double évolution dans la culture de l'endive

Une importante évolution a été apportée par l'arrivée des lignées et des variétés hybrides F_1 aptes à pommer sans terre de couverture. Elle a été double car elle a signifié, en même temps, le passage de la couche chauffée à la culture hors sol et celui d'une production en plein air en hiver à une production dans une salle de forçage, bâtiment climatisé et obscur.

La technique traditionnelle de forçage en couches consistait à placer des racines en terre et à les recouvrir de terre et de paille. On chauffait les couches, c'est-à-dire la terre dans laquelle les racines étaient placées.

La sélection menée à Versailles par l'INRA et le Ctifl a conduit à modifier certaines façons culturales. Tout d'abord, le forçage a été pratiqué en salle en conteneurs de 50 litres remplis de terre, puis de substrats plus légers, afin de mieux contrôler les conditions de croissance des plantes et de réduire la pénibilité du travail. Puis, on a tenté de supprimer la terre recouvrant les racines afin d'alléger les conteneurs. Enfin, pour diminuer encore le poids des conteneurs, l'idée d'une solution nutritive répondant aux exigences de croissance des plantes a été adoptée, remplaçant ainsi la terre dans laquelle les racines étaient installées.

C'est dans ces conditions que la sélection de lignées pures a été d'abord effectuée. Alors que la majorité des plantes développait des feuilles individualisées, une seule lignée a formé une pomme fermée, c'est-à-dire un chicon comparable à celui obtenu par la méthode traditionnelle avec terre de couverture. Ce caractère s'étant avéré transmissible par voie génétique, il a été introduit dans toutes les lignées. En raison de la trop faible vigueur des lignées pures, la solution des hybrides F_1 a été finalement retenue.

Ce changement dans le mode de production mis au point pour la sélection, a retenu l'attention des endiviers qui ont très vite vu ses avantages. Pour le rendre applicable à une production à grande échelle, un certain nombre de travaux de physiologie ont été nécessaires. Ils ont concerné la mise au point d'un test pour déterminer la maturité de la racine, donc le stade optimal d'arrachage, l'optimisation des conditions de conservation des racines avant forçage et la mise au point de la solution nutritive utilisée pendant le forçage.

Des travaux d'amélioration génétique et de physiologie, menés conjointement, ont donc permis de résoudre les deux principaux problèmes de la culture de l'endive qui étaient l'hétérogénéité des plantes et la pénibilité des travaux de forçage et de récolte. En même temps, le passage de la culture en pleine terre à la culture en salle de forçage a exigé des investissements de la part des endiviers. Tous n'ont pas pu les faire et cela a entraîné la disparition de nombreuses petites structures. D'importantes structures de production sont apparues et la production est désormais très concentrée. Mais simultanément, la production qui était localisée dans la seule région du Nord-Pas-de-Calais s'est aussi développée en Picardie et en Bretagne.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	NON
Mutagenèse induite	OUI La sélection de cellules résistantes à un herbicide, le chlorsulfuron, a été obtenue par criblage <i>in vitro</i> ('Eurêka').
Croisements interspécifiques	ESSAIS Des croisements ont été effectués entre cultigrupes de <i>C. intybus</i> (endive notamment) et cultigrupes de <i>C. endivia</i> (scarole et frisée).
Hybridation somatique	OUI La fusion de protoplastes de chicorée industrielle et de tournesol mâle stérile a permis d'obtenir des plantes mâles stériles de chicorée industrielle (stérilité « Desprez »). Ce caractère a ensuite été introduit chez l'endive ('Ermine', 'Montblanc').
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS En 1959, des essais de traitement de plantes à la colchicine ont été entrepris par l'INRA. L'hétérogénéité des plantes obtenues (triploïdes et tétraploïdes) a conduit à abandonner le projet.
Transgénèse	1^{re} réalisation de plantes transgéniques. La première transformation génétique de l'endive date de 1991. L'aptitude de l'endive à la culture <i>in vitro</i> et sa capacité naturelle à la néoformation directe de plantes à partir de racines sont des facteurs favorables à la réussite de la transformation. Caractères améliorés par transgénèse. Un système de contrôle de la fécondation croisée pour la réalisation d'hybrides notamment, a été intégré, mais il n'y a eu aucune demande d'autorisation de commercialisation.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Les parents chioggia (chicorée italienne, autre cultigruppe de <i>C.intybus</i>) des variétés de chicorée rouge à feuilles larges à forcer sont multipliés <i>in vitro</i> ('Rubima', 'Isatis'). L'endive a servi de plante modèle en culture <i>in vitro</i> pour des études de morphogenèse sur les conditions de néoformation de bourgeons inflorescentiels, notamment.
Sélection sanitaire	OUI L'aspect sanitaire entre dans l'ensemble des caractères retenus pour le choix des plantes porte-graines au stade de la production de semences.
Haploïdisation	ESSAIS Quelques plantes haploïdes ont été obtenues par croisements intergénériques et par culture de microspores isolées <i>in vitro</i> .
Recours à la stérilité mâle	OUI La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/tournesol « Desprez », obtenue par hybridation somatique chez la chicorée industrielle, a été transférée à la chicorée endive par rétrocroisements ('Ermine', 'Montblanc').
suite...	
... suite	

Recours à l'auto-incompatibilité	OUI L'auto-incompatibilité existe chez la chicorée sauvage, mais elle a été atténuée par la sélection chez l'endive. La compétition pollinique de l'endive peut être considérée comme une forme limitée du phénomène d'auto-incompatibilité : l'allopollen germe plus vite que l'autopollen sur le pistil, ce qui oriente le régime de reproduction vers l'allogamie. Cette propriété est mise à profit pour la production des semences des variétés hybrides F_1 de la « première génération » (c'est-à-dire toutes, sauf les plus récentes qui sont basées sur l'utilisation d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique).
Marquage moléculaire	OUI L'utilisation de marqueurs moléculaires a permis de démontrer en particulier que, lorsque la compétition pollinique est utilisée pour la production de semences hybrides, le taux d'hybridité n'atteint pas 100 %.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale Sélection généalogique Sélection récurrente réciproque
Types variétaux	Variété population Les variétés anciennes étaient de ce type. Variété lignée pure Ce type variétal a été considéré dans les années 1930 puis 1960, mais n'a pas été finalement retenu en raison de la trop faible vigueur des plantes. Variété hybride F_1 <i>Hybride F_1 fertile.</i> La compétition pollinique, qui existe naturellement chez l'endive, est exploitée pour la production des semences hybrides. Cependant, la variété n'est pas composée de 100 % de plantes hybrides, elle contient des plantes consanguines (<i>inbreds</i> , résultant d'autofécondations des parents). <i>Hybride F_1 mâle stérile.</i> La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/ tournesol « Desprez » permet le contrôle total de l'hybridation au stade de la production des semences et la variété est composée de 100 % d'hybrides.

Perspectives d'amélioration

La qualité du produit dans le respect de l'environnement est devenue un objectif essentiel présent à tous les stades de la culture.

La sélection doit être pratiquée pour obtenir un matériel végétal possédant une grande vigueur au stade plantule afin de pouvoir faire face aux problèmes de germination et d'implantation, puis capable de se développer dans des conditions d'apport réduit des intrants, notamment azotés. Il faut, par ailleurs, diversifier les sources de résistance aux désherbants sachant que le désherbage est un poste-clé dans la conduite de la culture de l'endive.

Au stade du forçage, il faut sélectionner des plantes produisant des racines pouvant former un chicon de qualité en condition de moindre quantité

d'intrants, le recyclage de la solution nutritive s'accompagnant de risques parasitaires importants.

Enfin, la diversification de la couleur du produit qui a commencé avec l'endive rouge, est toujours d'actualité.

Caractères à améliorer

Tolérances aux maladies. La plupart des maladies peuvent être contrôlées par la lutte chimique et par des mesures prophylactiques. Mais, il est intéressant d'exploiter les différences génétiques de comportement qui existent entre plantes. Ainsi, la tolérance à diverses maladies, en particulier d'origine bactérienne comme la pourriture humide des racines causée par *Dickeya dianthicola* (anciennement *Pectobacterium chrysanthemi* ou *Erwinia chrysanthemi*) et la pourriture molle du chicon causée par *Pectobacterium carotovorum*, (anciennement *Erwinia carotovora*), ainsi que celle causée par le champignon *Phytophthora cryptogea*, fait partie des objectifs actuels de sélection.

Adaptation à une fertilisation réduite en azote en fin de cycle de forçage. La fertilisation a récemment été réduite en fin de cycle de forçage de façon à ne pas rejeter trop d'azote dans l'environnement. La sélection de variétés moins exigeantes en azote en fin de cycle de forçage est un objectif actuel.

Qualité et tenue du produit après récolte. L'endive est un produit qui se conserve à l'état frais pendant un certain temps. L'augmentation de la durée de conservation suppose des qualités physiologiques et sanitaires de plus en plus nombreuses : absence de brunissement de l'axe, longueur réduite de l'axe, absence de rougissement du pétiole, absence de taches sur la bordure du limbe, absence de bactériose. Il existe une variabilité de comportements intéressante à exploiter.

Gamme de précocité. La gamme de précocité de récolte mérite d'être encore complétée.

Inscription et protection des variétés en France

1988, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue officiel chicorée endive ou witloof.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs, instituant un règlement technique annexe d'inscription.

En 2003, 37 variétés d'endive blanche et 3 variétés d'endive rouge étaient inscrites au catalogue officiel français et 73 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en

France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 35 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de ces 2 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre du contrôle des semences standards ou certifiées. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

Améziane R., Deléens E., Noctor G., Morot-Gaudry J.-F. et Limami A., 1997. Stage of development is an important determinant in the effect of nitrate on photoassimilate (^{13}C) partitioning in chicory (*Cichorium intybus*). *J. Exp. Bot.*, 48, 25-33.

Angiboust A., 1973. Des découvertes de l'INRA vont modifier profondément la culture de l'endive. *PHM*, 135, 29-35.

Bannerot H. et de Coninck B., 1984. Le progrès génétique chez l'endive en France. Développements récents. *Colloque Eucarpia « Légumes à feuilles »*, Versailles, 115-122.

Bannerot H., Foury C. et Breuils G., 2003. Chicorées. Dans : *Histoires des légumes : des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, éd. INRA Éditions, Paris, 236-247.

Bellamy A., Vedel F. et Bannerot H., 1996. Varietal identification and determination of genetic purity of F_1 hybrid seed samples, based on RAPD markers. *Plant Breed.*, 115, 128-132.

Chaux C.L. et Foury C., 1994. Endive ou chicorée witloof ou de Bruxelles. Dans : *Productions légumières – tome 2 – Légumes feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes*. Éditions Lavoisier, Paris, 367-397.

Doré C., 1998. Genetic improvement of etiolated chicory (*Cichorium intybus* L.) : from wild chicory to witloof. *Acta Hort.*, 467, 91-95.

Gagne J.-B., 1959. Le manuel de l'endivier. Supplément au n° 19 de *L'endivier français*, 204 p.

Gibault G., 1912. Chicorée witloof ou endive de Bruxelles. Dans : *Histoire des légumes*. Librairie horticole, Paris, 116-120.

Jolivet E., Lefèvre S. et de Coninck B., 1974. Détermination de la maturité de la racine de chicorée de Bruxelles à l'aide d'un test biochimique simple. *PHM*, 149, 4 p.

Jolivet E., Lefèvre S. et de Coninck B., 1976. Détermination de l'état physiologique de la racine tubérisée de chicorée de Bruxelles (*Cichorium intybus* L.) par son pouvoir réducteur à l'égard du 2,6-dichlorophénol-indophénol : application au repérage de la période optimale de forçage. *Physiol. Vég.*, 14, 849-863.

Laumonnier R., 1963. Les chicorées sauvages : chicorée à grosse racine de Bruxelles ou witloof. Dans : *Cultures maraîchères*. Éditions J.-B. Baillière et Fils, Paris, tome 2, 38-64.

Lavigne C., Millecamps J.-L., Manac'h H., Cordonnier P., Matejcek A., Vasseur J. et Gasquez J., 1994. Monogenic semidominant sulfonylurea resistance in a line of white chicory. *Plant Breed.*, 113, 305-311.

- Leteinturier J., Cochet J.-P., Marle M. et Begnini M.**, 1991. *L'endive, guide pratique*. Éditions Ctifl, Paris, 271 p.
- Limami A., Dufossé C., Richard-Molard C., Fouldrin K., Roux L. et Morot-Gaudry J.-F.**, 1996. Effect of exogenous nitrogen ($^{15}\text{NO}_3$) on utilization of vegetative storage protein (VSP) during regrowth in chicory (*Cichorium intybus*). *J. Plant Physiol.*, 149, 564-572.
- Margara J.**, 1977. Schéma du développement en culture *in vitro* de *Cichorium intybus* L. Exemple de type de plante bisannuelle de jour long à besoin de vernalisation. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 124, 491-501.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies de la laitue, des chicorées et de la mâche. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 461-481.
- Péron J.-Y.**, 1999. La chicorée de Bruxelles. Dans : *Productions légumières*, Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 210-218.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Rambaud C., Dubois J. et Vasseur J.**, 1993. Male-sterile chicory cybrids obtained by intergeneric protoplast fusion. *Theor. Appl. Genet.*, 87, 347-352.
- Reynaerts A., Van de Wiele H., De Sutter G. et Janssens J.**, 1993. Engineered genes for fertility control and their application in hybrid seed production. *Sci. Hortic.*, 55, 125-139.
- Richard-Molard C., Wuilleme S., Scheel C., Gresshoff P.M., Morot-Gaudry J.-F. et Limami A.M.**, 1999. Nitrogen-induced changes in morphological development and bacterial susceptibility of Belgian endive (*Cichorium intybus* L.) are genotype-dependent. *Planta*, 209, 389-398.
- Tesi R.**, 1990. Cicoria (*Cichorium intybus* L.). Dans : *Orticoltura*. V.V. Bianco et F. Pimpini éd., Patrone Editore, Bologne, 259-269.

La chicorée industrielle

Cichorium intybus L. var. *sativum* (Bisch.) Janch. ($2n = 2x = 18$)
(Astéracées ou Composées)

Présentation du cultigroupe

La chicorée industrielle *Cichorium intybus* L. var. *sativum* (Bisch.) Janch. est un cultigroupe de l'espèce *Cichorium intybus* L. Les premières traces de consommation de la chicorée remontent à l'Égypte ancienne où elle était utilisée et appréciée comme plante digestive et dépurative. Les racines de chicorée étaient alors découpées et mangées en apéritif. Il est probable que les herbes amères dont on parle dans la Bible contenaient des chicorées. Pline l'Ancien recommandait l'usage de la chicorée en médecine pour ses propriétés cicatrisantes, pour aider à la digestion et pour son effet légèrement laxatif. Plus tard, Charlemagne a rendu la culture de la chicorée obligatoire dans les jardins médicaux des châteaux. Il existe, dès le XVII^e siècle, des ouvrages sur le café mentionnant que le goût des décoctions de café s'apparentait à celui des décoctions de chicorée. En 1795, avec la guerre navale, le prix du café est devenu excessif et on a cherché à le remplacer par des produits locaux. Un Suisse du faubourg Saint-Germain à Paris fit fortune avec une décoction bien meilleure que les autres : la racine de chicorée torréfiée. La culture de la chicorée dite « à café » et celle de la betterave en France ne se sont réellement développées qu'en raison du blocus des ports européens. La culture de la chicorée industrielle (dite « à café ») s'est ensuite développée dans le nord de la France ainsi qu'en Belgique, en Allemagne et en Autriche. Les surfaces cultivées ont été multipliées par 15 entre 1872 et 1940. Le succès de cette plante s'explique, au moins en partie, par sa capacité à croître dans des sols infestés de nématodes impropres à la culture de la betterave.

La chicorée est une espèce allogame, bisannuelle et multipliée par semences. À l'état sauvage, la chicorée est une espèce endémique et ubiquiste qu'on peut trouver dans toute l'Europe et en Afrique du Nord, sous toutes latitudes et à toutes altitudes. Elle est présente sous forme subspontanée sur le continent américain, en Australie, en Afrique du Sud et en Asie jusqu'aux abords de la

Chine. Les flux de gènes entre espèces sauvages et espèce cultivée sont tout à fait possibles. Toutefois, ils sont, en pratique, limités car la récolte s'effectue au stade végétatif, donc avant la floraison. Seules les zones de production de semences (très contrôlées) pourraient éventuellement produire ces flux.

Les variétés de chicorée industrielle, sources de diversité, sont principalement françaises et belges. Les autres variétés ont plus de 20 ans, quand ce n'est pas 60 ans.

Les établissements Desprez Veuve et Fils se sont associés dans les années 1990 avec le GEVES et le BRG pour créer, maintenir et caractériser une collection de génotypes de chicorée industrielle. Cette collection fait partie de la collection de *Cichorium* qui comporte de nombreux cultigrupes de chicorées de l'espèce *C. intybus* (endive ou witloof, chicorées italiennes, pain de sucre, chicorée fourragère,...) et de *C. endivia* L. (chicorée frisée et scarole).

Production et utilisation

La partie récoltée est la racine tubérisée qui est découpée en cossettes (lamelles) en France et en cubes dans les autres pays producteurs, puis séchée pour être ensuite torréfiée (chicorée à torréfier, à boisson ou dite « à café »). Les cossettes peuvent également être utilisées fraîches pour l'extraction de l'inuline et des fructoses (chicorée à sucres).

La production mondiale de chicorée industrielle s'élève à plus d'1 million de tonnes de racines. La France et l'Inde avec 180 000 tonnes chacune (chicorée industrielle à torréfier essentiellement) et surtout la Belgique avec 760 000 tonnes (chicorée industrielle à sucres) ainsi que les Pays-Bas, la Pologne et l'Afrique du Sud sont les principaux producteurs (données FAO, 2004). La chicorée industrielle est aussi cultivée en Europe de l'Est, en Espagne, au Portugal et récemment aux États-Unis (Nébraska). La surface mondiale peut être estimée à 40-50 000 hectares.

La chicorée est une plante presque entièrement destinée à l'industrie agro-alimentaire : chicorée à sucres, chicorée à torréfier pour les boissons et cossettes séchées et concassées, puis incorporées dans les croquettes pour chiens et chats. Aujourd'hui, l'essentiel est destiné à l'industrie sucrière avec moins de 20 % de la production mondiale destinée aux boissons.

Industrie

Industrie sucrière. La racine de chicorée contient de 16 à 19 % d'inuline (dans certaines conditions climatiques favorables, c'est-à-dire plus méridionales que le nord de l'Europe, les teneurs en inuline peuvent atteindre 20 à 22 %). L'inuline est un polyfructosane, sucre composé d'une molécule de saccharose et de 2 à plus de 50 molécules de fructose. Lorsque les chaînes de fructose sont longues, le pouvoir sucrant est faible et l'inuline se comporte comme une fibre alimentaire qui peut avoir de très nombreuses applications dans le secteur agroalimen-

taire. Les longueurs moyennes des chaînes d'inuline ont un impact sur la valeur nutritionnelle effective des fibres. Il ne faut pas oublier que l'effet essentiel de l'inuline est prébiotique, c'est-à-dire favorable à la croissance de certains germes intestinaux utiles.

À l'inverse, l'inuline peut être hydrolysée pour produire du fructose, sucre particulièrement intéressant en raison de son pouvoir sucrant (il peut être consommé par les diabétiques car il est aussi beaucoup moins énergétique que le saccharose) et de sa capacité à ne pas cristalliser (propriété exploitée en pâtisserie et confiserie). Mais, il s'agit en fait d'un produit similaire au jus de fructose couramment fabriqué à partir du maïs (*Zea mays* L. subsp. *mays*).

Une gamme de produits à chaînes de molécules plus ou moins longues peut ainsi avoir de très nombreuses applications exploitant un pouvoir sucrant plus ou moins élevé avec un effet fibre variable.

Industrie de la torréfaction. La chicorée à torréfier sert à la fabrication de la boisson chicorée. La racine est découpée en cossettes qui sont séchées et ensuite torréfiées (les sucres, notamment l'inuline, sont partiellement dégradés en fructose, puis caramélisés tandis que l'intybine, substance amère, se combine avec l'inuline pour donner une saveur aromatique) avant d'être commercialisées sous forme de grains, de poudre soluble ou d'extrait liquide concentré. Il s'agit le plus souvent de boissons solubles fabriquées en association avec du café ou d'autres matières premières (malt, caroube, sucre, etc.).

Pharmacopée. À part l'effet prébiotique, d'autres effets favorables à la santé (des effets anti-inflammatoires) ont été récemment démontrés par des tests biologiques. Les molécules à l'origine de ces effets restent à découvrir pour la plupart. La chicorée est utilisée dans la préparation de tisanes, de sirops et de laxatifs légers et entre dans la composition de certains médicaments. Ses propriétés en font un bon produit de charge pour les pilules. Elle est également utilisée pour la fabrication de pâtes dentifrices et de bains de bouche.

Alimentation animale. La chicorée industrielle peut aussi être pâturée par les ovins, les bovins et par le gibier (grands animaux et oiseaux sauvages) et ainsi servir de fourrage. Il existe des variétés fourragères développées en Nouvelle-Zélande.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

'Tête d'anguille', 'Chicorée de Magdebourg', 'Courte de Silésie', 'Pont de pierre' sont quelques-unes des variétés populations anciennes, cultivées jusque dans les années 1970 dont la longueur importante de la racine est propice à un arrachage manuel dans les terres sableuses du littoral du nord de la France.

Variétés récentes

1981, **‘Tilda’** (Bataille, France) variété population ayant une forme de racine favorable à l’arrachage mécanique (racine courte). Elle a été inscrite en Belgique mais pas en France.

1984, **‘Pévele’** (Florimond Desprez, France), première variété résistante à la montée à graines qui présentait l’intérêt de pouvoir être semée 15 jours plus tôt que les autres variétés (début avril au lieu de mi-avril). À l’époque, 5 000 ha de cette variété étaient cultivés. C’était une variété population produisant des racines à teneur moyenne en matière sèche. C’est la première variété conciliant rendement, teneur en matière sèche et résistance à la montée à graines. C’est aussi une des premières variétés dont la racine a une forme propice à l’arrachage mécanique (racine courte).

1986, **‘Cassel’** (Florimond Desprez, France), variété synthétique ayant connu un certain succès commercial avec une très forte capacité de rendement qui fait toujours référence en 2003.

1987, **‘Orchies’** (Florimond Desprez, France), variété synthétique cumulant un bon rendement et une bonne résistance à la montée à graines. Cette variété a représenté 90 % du marché. Elle a représenté 80 % des parts de marché en Belgique alors qu’elle n’était pas inscrite sur le catalogue officiel belge. C’est la variété la plus cultivée en France en 2002.

1988, **‘Bergues’** (Florimond Desprez, France), première variété hybride basée sur la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/tournesol « Desprez ».

1993, **‘Rubis’** (Florimond Desprez, France), première variété hybride dont le parent femelle est mâle stérile (stérilité mâle nucléaire « Edith ») et multiplié *in vitro*.

1999, **‘Améthyste’** (Desprez Veuve et Fils, France), première variété hybride triploïde, utilisant la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Desprez ».

2000, **‘Maurane’** et 2002, **‘Nausica’** (Chicoline, Groupe Warcoing, Belgique), variétés synthétiques diploïdes, cultivées pour la production d’inuline destinée à l’industrie sucrière. Elles ont été sélectionnées pour leur grande longueur de chaînes d’inuline et pour leur taux de fructose libre en fin de saison, le plus faible possible.

2000, **‘Oésia’** (Nestlé, Pays-Bas), première variété hybride de clones utilisant la compétition pollinique. Les deux parents sont clonés *in vitro*.

2001, **‘Opaline’** (Desprez Veuve et Fils, France), première variété polyploïde hybride, utilisant la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Desprez ».

2002, **‘Fasté’** (Nestlé, Pays-Bas), variété hybride de clones utilisant la compétition pollinique. Les deux parents sont clonés *in vitro*. Cette variété est caractérisée par une haute teneur en matière sèche réduisant le coût de séchage des cossettes ou des cubes pour la fabrication de la chicorée boisson.

Remarque. Ces dernières années, une nouvelle gamme variétale est apparue, basée sur un nombre toutefois restreint de cytoplasmes mâles stériles.

Regard sur 50 ans de sélection

Bien que cultivée en Europe de manière significative dans deux pays seulement, des progrès importants ont été obtenus sur cette plante du fait d'une bonne coopération entre la sélection et l'industrie de transformation primaire.

La chicorée est principalement sélectionnée en Belgique et en France. Le passage des variétés populations aux variétés hybrides, notamment celles réalisées à l'aide de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique (*cf.* encadré ci-dessous), ainsi que l'introduction de la triploïdie sont des événements marquants de l'amélioration de cette plante.

Caractères importants améliorés

Résistance à la montée à graines en première année. La résistance à la montée à graines, qui permet d'allonger la période de végétation a été améliorée, apportant ainsi une augmentation du rendement. C'est un facteur primordial pour les zones du nord de l'Europe ou à risque de vernalisation par le froid après semis. En 30 ans de sélection, près de deux mois de végétation ont pu être gagnés : les semis étaient pratiqués mi-mai à début juin, actuellement ils sont réalisés début avril et pourraient être effectués sans trop de problèmes mi-mars. C'est également un facteur important pour le sud de la France, le Portugal ou d'autres régions productrices à climat chaud, en raison des risques d'induction de montaison par stress hydriques et thermiques (fortes chaleurs).

Rendement. L'allongement de la période de végétation a été une des grandes causes de l'augmentation du rendement. Le passage aux hybrides F_1 , grâce à

La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/tournesol « Desprez »

Une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique a pu être obtenue par fusion de protoplastes de mésophylle de chicorée industrielle fertile et d'hypocotyle de tournesol mâle stérile. La chicorée et le tournesol (*Helianthus annuus* L.) appartiennent à une même famille, les Astéracées (Composées), mais font partie de deux sous-familles différentes : les Cichoroïdées pour la chicorée et les Astéroïdées pour le tournesol.

Une analyse moléculaire du génome mitochondrial des plantes mâles stériles de chicorée industrielle obtenues a montré qu'il y a eu recombinaison des génomes mitochondriaux des deux espèces et que des fragments d'ADN mitochondrial spécifique de la stérilité mâle du tournesol sont présents.

Réalisée à l'université de Lille (Nord) pour les établissements Florimond Desprez, cette hybridation somatique a permis non seulement d'obtenir des plantes mâles stériles de chicorée industrielle, mais aussi, après rétrocroisements, des plantes de chicorée endive ou witloof (*cf.* fiche p. 207). Cette innovation a permis de diffuser des variétés de type hybride F_1 dans ces deux cultigrupes de chicorée.

l'utilisation d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique (cf. encadré p. 223), a lui aussi, permis d'obtenir un gain de rendement évalué à 10 %. Celui-ci est passé, en France, de 34,8 t/ha en 1961 à 45 t/ha en 2000. Dans le sud-ouest de la France, on atteint 60–65 tonnes de racines/ha.

Teneur en matière sèche soluble. L'amélioration de ce caractère a été un objectif majeur car la rentabilité de la culture y est directement liée. En culture, la teneur moyenne de matière sèche soluble a augmenté de plus de 2 points en 30 ans.

Facilité d'arrachage. La sélection d'une racine de forme cylindro-conique a contribué à l'introduction de l'arrachage mécanique, de même que l'introduction de la triploïdie.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	OUI Des cellules d'endive (autre cultigroupe de <i>C. intybus</i>) résistantes à un herbicide, le chlorsulfuron, ont été obtenues par criblage <i>in vitro</i> . Cette résistance est en cours de transfert dans la chicorée industrielle.
Croisements interspécifiques	EN COURS Des croisements sont réalisés à titre prospectif plutôt que dans un but précis.
Hybridation somatique	OUI La fusion de protoplastes de chicorée industrielle et de tournesol mâles stériles a été réalisée pour induire la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique de chicorée/tournesol « Desprez » ('Bergues').
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Il existe des variétés triploïdes qui présentent l'avantage d'être plus stables que les variétés diploïdes ('Améthyste'). Le fait de posséder plus de génomes permet d'avoir plus d'allèles, ce qui peut être très bénéfique dans le cas où l'on peut jouer sur l'additivité (montée à graines). Par contre, ces variétés sont plus longues à produire et les variétés triploïdes ne peuvent pas être réutilisées pour continuer la sélection. Les pollinisateurs sont tétraploïdes. Les hybrides inverses (femelles tétraploïdes) sont encore plus difficiles à produire.
Transgénèse	1 ^{re} réalisation de plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur la chicorée industrielle en 1989 (introduction du gène <i>uidA</i> codant pour la β-glucuronidase (GUS) et du gène codant l'acétolactate synthase qui confère la résistance aux herbicides de la famille des sulfonylurées).

suite...

... suite

Caractères pouvant être améliorés par transgénèse. Il sera peut-être possible de modifier la longueur des chaînes glucidiques. Ainsi, des programmes ont été mis en place pour introduire les gènes modifiés codant les enzymes de synthèse ou de dégradation des chaînes d'inuline (enzymes FEH, SST, FFT, hydrolases...). L'approche est identique à celle engagée pour la betterave (réussie) et la canne à sucre (en cours).
Aucune variété de chicorée transgénique n'est autorisée à la commercialisation.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI La multiplication végétative <i>in vitro</i> , facile chez la chicorée, est utilisée pour le clonage des géniteurs ('Faste', 'Rubis'). La cryoconservation de méristèmes est pratiquée.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	ESSAIS Les essais actuels n'ont pu déboucher sur l'exploitation de la méthode en sélection.
Recours à la stérilité mâle	OUI Stérilité nucléaire récessive « Edith » ('Rubis'). Stérilité mâle nucléo-cytoplasmique chicorée/tournesol « Desprez » ('Améthyste', 'Bergues').
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Compétition pollinique ('Faste').
Marquage moléculaire	OUI L'analyse moléculaire et la cartographie sont utilisées pour la sélection assistée par marqueurs. Le contrôle de la qualité des lots de semence peut être effectué par voie moléculaire.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale maternelle Sélection généalogique Sélection récurrente
Types variétaux	Variété population Variété hybride : diploïde, triploïde ou polyploïde à l'aide d'une stérilité mâle nucléaire récessive ('Rubis') ou nucléo-cytoplasmique ('Bergues').

Perspectives d'amélioration

La prédominance de la chicorée à sucres par rapport à la chicorée boisson devrait se renforcer.

En ce qui concerne les orientations et les perspectives pour la chicorée à sucres, l'amélioration génétique doit se poursuivre pour accompagner son essor industriel (deux nouvelles usines sont à l'étude, 1 en France et 1 au Chili pour la production d'inuline). Quant à la chicorée à torréfier dont l'importance des

surfaces cultivées a beaucoup diminué en 2002 et en 2003 (compte tenu d'une surproduction), la découverte de débouchés nouveaux est vitale avec la mise au point de nouvelles boissons. Par ailleurs, le développement de nouveaux produits alimentaires à base de farine de cossettes sèches est également une cible à privilégier.

Par ailleurs, il est indispensable que la mise en évidence de certains effets favorables à la santé s'accompagne de l'identification précise des principes actifs en cause, puis de leur sélection pour une teneur optimale.

Enfin, la chicorée industrielle connaît un certain développement dans les pays où le séchage au soleil est possible, permettant de réduire considérablement le coût des premières étapes de la transformation industrielle primaire.

Caractères à améliorer

Teneur élevée en inuline à longue chaîne. La racine de chicorée contient un peu moins de 20 % d'inuline de son poids frais. L'inuline a bon goût et a l'avantage de pouvoir être utilisée de multiples façons. La teneur en inuline est donc, sans doute, le caractère à améliorer en priorité avec deux critères importants à considérer : le degré de polymérisation et le rapport fructose / glucose, bien que les méthodes d'analyse manquent. Jusqu'à présent, ces analyses sont réalisées par chromatographie liquide à haute performance (HPLC). La teneur en « petits sucres » (c'est-à-dire surtout fructose et glucose) est au contraire à contre-sélectionner. L'arrivée des premières journées de gel du début novembre augmente fortement l'hydrolyse des chaînes de molécules et augmente la teneur en petits sucres. La qualité se dégrade alors de façon importante.

Rendement. Le rendement en racine, la teneur en matière sèche et la teneur en inuline sont des caractères importants qui pourraient encore progresser grâce à l'exploitation de l'hétérosis et à la généralisation de la triploïdie. Le rendement peut être aussi beaucoup amélioré en déplaçant les zones de culture vers des zones plus méridionales où l'on peut, soit utiliser des séchoirs industriels existants pour d'autres applications hors saison, soit pratiquer le séchage au soleil (pour la chicorée à boisson).

Vigueur au départ. La rapidité d'implantation de la plante au printemps étant déterminante, la vigueur de la plantule dans les premiers jours est un objectif important de sélection.

Tolérances aux maladies. La sélection s'oriente actuellement vers la recherche de tolérances au rhizoctone brun, *Rhizoctonia solani*, champignon induisant une maladie de la racine et à l'oïdium (*Erysiphe cichoracearum*), champignon provoquant une maladie du bouquet foliaire. La recherche de tolérances vis-à-vis d'autres agents pathogènes tels que des champignons comme *Thielaviopsis basicola* qui sévit sur racines, *Alternaria dauci* et une bactérie *Pectobacterium carotovorum* (anciennement *Erwinia carotovora*), est en cours également.

Forme de la racine. Des travaux de sélection sont actuellement réalisés pour créer des variétés à racine plus courte encore mieux adaptée à l'arrachage mécanique, moins cassante et permettant de réduire la tare terre (quantité de terre qui reste accumulée après la récolte au niveau de la racine).

Désherbage. Le désherbage de cette plante reste toujours délicat. La résistance à un herbicide (chlorsulfuron) obtenue par mutagenèse induite *in vitro* (gène de l'acétolactate synthase, ALS) chez l'endive, constitue une solution possible. Elle est en cours de transfert à la chicorée industrielle.

Amélioration de la production grainière pour les variétés hybrides triploïdes. La faible production de semences triploïdes, qui constitue un frein au développement de ces variétés hybrides, doit être améliorée.

Contrôle de la qualité. D'autres caractéristiques relatives à la qualité doivent être désormais considérées :

- contrôle de l'amertume (ce caractère est important pour la chicorée à boisson ou pour d'autres utilisations industrielles émergentes comme l'utilisation de farine de chicorée dans des mélanges à 0,5 % dans de la farine de blé pour fabriquer des pains, des viennoiseries),
- vérification de la présence ou de l'absence de substances allergènes,
- contrôle de la quantité d'ions en les réduisant. Pour le calcium, le potassium et le sodium, il s'agit de faciliter l'extraction de l'inuline et de diminuer les problèmes de rejets d'usine.

Ces caractéristiques sont d'autant plus justifiées que la quantité journalière consommée est importante (cas des croquettes pour les animaux familiers).

Il faudra aussi certainement sélectionner pour la richesse en principes actifs quels qu'ils soient, à l'origine des avantages santé de la chicorée (par exemple, il est indispensable d'augmenter la teneur en principes anti-inflammatoires, si l'on veut revendiquer cette activité dans des aliments).

Techniques à développer

Il est essentiel de développer des techniques de routine pour remplacer l'HPLC et pour permettre des mesures précises de chaînes de molécules (au niveau qualitatif et au niveau quantitatif). La technique d'absorption du rayonnement proche infra-rouge (NIR) commence à être développée, mais elle a des limites. La mise au point de tests d'infections artificielles est à l'étude pour des maladies foliaires et surtout racinaires.

D'un point de vue génétique, des plantes haploïdes seraient les bienvenues.

Enfin, une cartographie se développe et permettra d'appliquer la SAM.

Inscription et protection des variétés en France

1984, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste chicorée industrielle.

En 2003, 18 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 38 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Dans les épreuves réalisées par le GEVES, 15 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. À l'issue de ces 2 ans, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant deux ans dans un réseau national d'essais agronomiques pour apprécier sa productivité et sa valeur d'utilisation. Dans le cas de la chicorée industrielle, ce réseau est de taille très réduite et actuellement, limité à la région nord de la France, dans les zones traditionnelles de culture de la chicorée (Flandres, Pévèle). Les variétés sont également testées dans un essai spécifique pour évaluer leur résistance à la montée à graines. Les variétés candidates sont comparées à des témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par deux variétés parmi les plus cultivées. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Pour en savoir plus

Boulineau F., Kelechian V., Doré C. et Desprez B., 1994. Les chicorées. *Sauve qui peut*, (6-7), 26-28.

Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. Chicorée industrielle. Séance spéciale du 30 novembre 1994, 84 p.

Desprez B., 1993. *Recherche de méthodes d'obtention de plantes haploïdes chez la chicorée (Cichorium intybus L.)*. Thèse de doctorat de l'université Paris XI-Orsay, 175 p.

Moule C., 1973. La chicorée à café. Dans : *Les plantes sarclées et diverses*. Éditions La Maison rustique, Paris, 246-247.

Rambaud C., Dubois J. et Vasseur J., 1993. Male-sterile chicory cybrids obtained by intergeneric protoplast fusion. *Theor. Appl. Genet.*, 87, 347-352.

Vermeulen A., Vaucheret H., Pautot V. et Chupeau Y., 1992. *Agrobacterium* mediated transfer of a mutant *Arabidopsis* acetolactate synthase gene confers resistance to chlorsulfuron in chicory (*Cichorium intybus* L.). *Plant Cell Rep.*, 11, 243-247.

(voir aussi références bibliographiques p. 216 et 217)

Le chou

Brassica oleracea L. *partim* ($2n = 2x = 18$)
(Brassicacées ou Crucifères)

Les choux croissent à l'état sauvage sur les falaises littorales de l'Europe. Les botanistes les ont classés dans une douzaine d'espèces élémentaires, sur la base de leurs caractères morphologiques. En effet, les populations de choux sont souvent éloignées géographiquement les unes des autres, ce qui a favorisé leur différenciation. Mais, tous ces taxons ont le même génome et sont à considérer comme des sous-espèces. La sous-espèce *oleracea* (*Brassica oleracea* L. *sensu stricto*) est répandue le long de la mer du Nord, la Manche et l'Atlantique. Plusieurs autres sous-espèces sont présentes en Méditerranée, en particulier en Sicile. En France, on trouve la sous-espèce *robertiana* (J.Gay) Rouy & Foucaud sur la côte méditerranéenne et la sous-espèce *insularis* (Moris) Rouy & Foucaud en Corse. La sous-espèce *cretica* est spontanée en Grèce et considérée comme introduite au Liban. Ces choux sauvages ont dû être remarqués et cueillis un peu partout dès la Préhistoire par nos ancêtres. Les feuilles tendres font un légume excellent, et les pousses ont donné les premiers brocolis. Les Grecs continuent de nos jours à cueillir des pousses de chou sauvage. Dans le passé, on en trouvait aussi en Angleterre sur le marché de Douvres.

Le chou est l'une des espèces végétales les plus diversifiées et l'histoire de sa domestication reste obscure. Il y a probablement eu plusieurs événements de domestication, suivis de diffusion des premières formes cultivées, d'hybridation avec les diverses sous-espèces et de diversification en fonction d'usages différents. Il est possible que les Celtes du nord-ouest de l'Europe aient domestiqué les premiers choux, et que les Phéniciens les aient introduits à Carthage, où les Romains les auraient connus (le nom *brassica* serait d'origine phénicienne). L'Italie va ensuite constituer un important centre de diversité. Au début de notre ère, on pouvait déjà distinguer des formes qui annonçaient les cultigraines modernes, mais ceux-ci ne se sont vraiment différenciés qu'un millénaire plus tard.

Présentation des cultigroupes

Le chou-fleur, Brassica oleracea Groupe Botrytis (syn. : var. botrytis L.)

Le chou-fleur se caractérise par une modification de l'appareil reproducteur (hypertrophie des rameaux pré-floraux), les boutons floraux restant indifférenciés. En Italie et en France (jusque dans les années 1970), on a longtemps appelé « brocoli » les choux-fleurs d'hiver. Si le chou-fleur le plus répandu a une pomme de couleur blanche, il en existe en Italie de couleur violette, verte ou jaune. Le type Romanesco est qualifié de « broccolo » en Italie, et ses formes traditionnelles ont une pomme centrale et des pommes latérales.

Le chou-fleur provient probablement du chou sauvage de la Grèce (*Brassica cretica* Lam.), introduit par les Grecs au Proche-Orient, où une population subsistante subsiste au Liban. Il aurait été sélectionné au Proche-Orient, d'où Ibn al'-Awwâm le cite au XII^e siècle. Au travers de ses noms successifs (chou de Syrie, chou de Chypre, puis chou de Candie, de l'ancien nom de l'île de Crète, et enfin chou de Malte), on peut suivre sa diffusion d'est en ouest jusqu'à l'Italie, où il arrive au XVI^e siècle et où il va se diversifier prodigieusement, au contact des nombreux autres choux cultivés depuis l'Antiquité. Son introduction en France est notée par Olivier de Serres en 1600 sous le nom de *caulifiori*, traduit ensuite comme chou-fleur. Curieusement, il va immédiatement être introduit à Haïti par les Français, et se répandre dans les Amériques.

Le développement du chou-fleur et celui du brocoli ont accompagné les grands voyageurs à partir du XVI^e siècle, puis, plus tard, l'immigration européenne vers l'Amérique. Les exigences de la culture du chou-fleur le limitent au climat océanique avec des températures douces et régulières. En France, la culture de ce légume n'a réellement débuté qu'au XVII^e siècle. Il a d'ailleurs fallu attendre la fin de ce siècle pour le multiplier par semis avec succès. La France s'est ensuite spécialisée dans la culture de ce légume, et à la fin du XIX^e siècle plus de 20 variétés étaient déjà disponibles.

Le chou brocoli, Brassica oleracea Groupe Cymosa (syn. : var. cymosa Duch.)

Les brocolis se caractérisent par une modification de l'appareil reproducteur (hypertrophie des rameaux pré-floraux), les boutons floraux étant bien différenciés à la récolte. Leur centre de diversité est en Italie, où divers choux sauvages locaux ont dû contribuer à leur diversification. Il en existe de nombreux types traditionnels, dont certains forment un grand nombre de tiges minces (les « brocolis à jets »), alors que d'autres forment une pomme centrale plus développée. C'est le cas du type « Calabrese », dont les formes traditionnelles développent des pommes latérales après la récolte de la pomme centrale, et qui a été introduit aux États-Unis par des émigrants italiens vers 1900, et sélectionné pour former une pomme unique.

Ce n'est qu'en 1530 que le terme brocoli apparaît dans la langue française, mais ce terme a pu désigner aussi bien des brocolis à jets que des choux-fleurs d'hiver. Les brocolis à jets ont progressivement disparu, et ce n'est que depuis les années 1980 que le Calabrese a commencé à être connu en France, grâce aux variétés améliorées aux États-Unis.

Le chou blanc, *Brassica oleracea* Groupe *Capitata*
(syn. : var. *capitata* L., var. *alba* DC.)

Le chou pommé blanc (ou chou cabus blanc) est probablement originaire d'Italie du Nord, comme l'atteste la diffusion de ses noms. Il se caractérise par des feuilles imbriquées les unes sur les autres, formant une « pomme » plus ou moins serrée. Il semble s'être différencié au X^e siècle, et a pris une grande importance dans l'alimentation au Moyen Âge. La culture du chou d'abord « campagnarde » s'est développée en particulier à la périphérie des villes (le nom de nombreux villages autour de Paris est associé à des variétés) et a perduré jusqu'au début du XX^e siècle. Elle est depuis en régression. Ce type de chou doit sa popularité notamment au fait qu'il est disponible à l'état frais toute l'année et en même temps sous forme de conserve en choucroute.

La diffusion du chou blanc en Europe de l'Est est intimement liée à l'invention de la choucroute. Ce produit fait partie de la grande famille des légumes fermentés répandus dans les régions de climat continental depuis la Préhistoire. Point n'est donc besoin de faire appel à la légende d'une introduction de Chine par les Tartares ou les Mongols. Depuis la Préhistoire, on conservait des mélanges de légumes sauvages par fermentation lactique. Cette technique a été appliquée au chou pommé, d'abord (aux XI^e-XII^e siècles) entier simplement coupé en quatre (*Kumst* désigne en allemand cette choucroute primitive), puis au XV^e siècle en les râpant et en les additionnant de condiments qui en amélioreraient la conservation et le goût (*Sauerkraut* désigne en allemand la choucroute faite de chou haché). Comme la fermentation ne détruit pas la vitamine C, la choucroute a joué un rôle considérable dans l'amélioration de la santé des peuples d'Europe de l'Est.

En France, le mot « sorcrote » est attesté dès 1739, et il apparaît sous sa forme « choucroute » en 1768. C'est la forme alsacienne de ce plat qui se répand à Paris au XVIII^e siècle, puis dans toute la France après 1918 et le retour de l'Alsace à la France. Enfin, à l'époque des grandes découvertes (au XVIII^e siècle), la choucroute fait le tour du monde. L'Anglais James Lind fut l'un des premiers à reconnaître son intérêt pour combattre le scorbut, et le navigateur James Cook décida de charger des barils de choucroute quand il partit pour le Pacifique Sud à bord de l'*Endeavour*. L'expérience fut tellement concluante que l'administration anglaise créa de grands entrepôts à choucroute, et que celle-ci devint une denrée indispensable pour les expéditions lointaines.

Parmi les types de chou blanc, on distingue parfois le chou pointu, ou chou de printemps, qui a une pomme lâche et souvent pyramidale.

Le chou rouge, Brassica oleracea Groupe Rubra (syn. : var. rubra DC.)

Le chou rouge a suivi le chou blanc dans sa diffusion, même si son origine est difficile à préciser. Il apparaît de façon sûre chez les botanistes de la fin du XVI^e siècle. En France, il a longtemps été plus apprécié pour ses qualités médicinales qu'alimentaires. De nos jours, la salade de chou rouge cru est devenue l'une des crudités les plus répandues en France. Par contre, dans le nord et l'est de l'Europe, le chou rouge est également mangé cuit.

Le chou de Milan, Brassica oleracea Groupe Sabauda (syn. : var. sabauda L.)

Le chou de Milan est le plus souvent appelé chou frisé ou chou vert sur les marchés français. Il est originaire du nord de l'Italie, mais il n'apparaît avec certitude qu'au XVI^e siècle. Il se caractérise par le limbe des feuilles cloqué entre les nervures.

Autres cultigrupes

Le chou-rave (Groupe *Gongylodes* ou var. *gongylodes* L.) est caractérisé par la base de la tige renflée en boule. Il est surtout apprécié dans le pourtour méditerranéen et en Europe centrale. Le chou de Bruxelles (Groupe *Gemmifera* ou var. *gemmifera* DC.), caractérisé par une tige unique terminée par une rosette terminale non pommée et des bourgeons latéraux pommés, est apparu au XVIII^e siècle en Belgique, pour se répandre dans le nord-ouest de l'Europe. Le chou frisé non pommé (Groupe *Sabellica* ou var. *sabellica* L.) est cultivé dans le nord de l'Europe, où il est souvent récolté après les premières gelées. D'autres choux verts non pommés sont cultivés un peu partout en Europe, pour l'alimentation humaine ou animale. Le chou moëllier (Groupe *Medullosa* ou var. *medullosa* Thell.), originaire de l'ouest de la France, a une tige renflée en fuseau, et est cultivé comme plante fourragère. Le chou à grosses côtes (Groupe *Costata* ou var. *costata* DC.) forme une pomme lâche, et ce sont les nervures principales que l'on consomme ; il est surtout apprécié au Portugal.

Le chou est une espèce allogame, bisannuelle, auto-incompatible, multipliée par semences. Le chou-fleur et le chou brocoli sont annuels ou bisannuels selon la durée du cycle biologique et la précocité de pomaison avec un niveau d'incompatibilité en général plus faible que celui des choux pommés.

Les nombreux cultigrupes (en particulier, le chou fourrager *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., le chou de Bruxelles et le chou rave qui appartiennent tous à l'espèce *B. oleracea* peuvent s'intercroiser ainsi que les formes sauvages de *B. oleracea*. L'ensemble de la variabilité du genre *Brassica* L. est accessible par croisements sexués. Ainsi, une variété cultivée de chou-fleur peut polliniser une population de chou sauvage de *B. oleracea* (mais elles ne croissent pas dans la même zone) et les autres cultigrupes de chou ou être pollinisée par ceux-ci au cours de la production de semences. Le risque induit par les cultures de voisinage de chou-fleur est nul (récolte avant floraison). Par contre, pour la production de semences, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs d'isolement

très stricts garantissant l'absence de tout chou dans un rayon de 2 km autour d'une parcelle de production.

Il existe des collections de ressources génétiques, notamment au Royaume-Uni (IHR, Wellesbourne) et aux Pays-Bas (CGN, Wageningen). En France, la création d'un conservatoire à l'INRA-ENSAR de Rennes (Ille-et-Vilaine) a permis de sauvegarder l'essentiel de la diversité des populations locales françaises de chou-fleur. Le Centre de Ressources biologiques « Crucifères légumières » qui associe, outre l'INRA de Rennes, des organismes privés et publics français a été créé récemment. Il est inséré dans un dispositif de collections au plan européen.

Production et utilisation

La partie récoltée est la « pomme ». La « pomme de chou-fleur » est une pré-inflorescence hypertrophiée récoltée au stade natif. Les variétés de chou-fleur commercialisées en France sont, en général, dépourvues de pigment, mais on assiste actuellement au développement de variétés à pomme verte ou orange. Les variétés traditionnelles italiennes sont très colorées, violettes, vertes ou jaunes. La forme orange cultivée aujourd'hui vient d'une mutation détectée chez des formes blanches. La « pomme de chou brocoli » ou « tête » est une inflorescence hypertrophiée, verte, récoltée au stade préfloral où l'hypertrophie est limitée à l'axe principal et aux ramifications de la hampe. Enfin, « la pomme de chou pommé » est une structure au stade végétatif, composée de feuilles imbriquées de façon plus ou moins serrée le long d'une tige courte.

Il est important de préciser la distinction entre le chou-fleur et le chou brocoli. Dans le cas du chou-fleur, on consomme des méristèmes, tandis que dans le cas du chou brocoli, on consomme des boutons floraux dont les pétales et les étamines sont différenciés.

La production mondiale de chou-fleur est de 16,4 millions de tonnes. Parmi les 80 pays producteurs répartis sur tous les continents, les principaux sont la Chine (7,3 millions de tonnes) et l'Inde (4,8 millions de tonnes) (données FAO, 2004). Avec une production de 410 000 t en 2004, c'est actuellement le type de chou le plus cultivé en France. Une grande partie de la production française est exportée durant l'hiver vers des pays du nord de l'Europe (tels que le Danemark, l'Allemagne ou le Royaume-Uni), car la production de chou-fleur en hiver n'y est pas possible. C'est le premier légume français pour l'exportation. La production française de chou brocoli est de 29 000 tonnes (données Ctifl, 2004).

Plus de 130 pays cultivent les différents choux pommés pour une production mondiale de plus de 68 millions de tonnes. Les choux cabus blancs représentent l'essentiel du marché, les choux rouges ne représentant guère plus de 5 % et les choux de Milan étant spécifiques de quelques pays en dehors de l'Europe. La production française de choux pommés est de 410 000 tonnes. La Chine, avec

plus de 32 millions de tonnes, est de loin le producteur le plus important (données FAO, 2004). Mais, en Chine, les « choux pommés » sont principalement des choux chinois, appartenant à une autre espèce de *Brassica* : le pak-choï *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis* (L.) Hanelt et le pé-tsaï ou chou de Shanton, *Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis* (Lour.) Hanelt.

Le chou brocoli et le chou-fleur sont des légumes consommés frais ou après surgélation sous forme de fleurons ou fleurettes (parties de la pomme obtenues après élimination de la tige principale). En 50 ans, la consommation de chou-fleur n'a pas augmenté en France, c'est même le légume dont la consommation a le plus reculé depuis 1992. Dans le cas du brocoli, au contraire, la consommation, encore marginale il y a une vingtaine d'années, ne cesse de progresser.

Les choux pommés (choux cabus, blanc et rouge, et chou de Milan) sont aussi consommés frais, crus ou cuits, ou bien en choucroute, c'est-à-dire fermentés sous forme de conserve. La choucroute est obtenue par la fermentation lactique spontanée (développement de différents *Lactobacillus* notamment) de chou salé et coupé en fines lanières. Pour la production de choucroute, en France, en Allemagne et aux Pays-Bas, on utilise des variétés tardives de chou cabus à pomme compacte et de gros calibre (pesant de 5 à 10 kg) et intérieur blanc. La production française de choucroute a été de 110 000 tonnes en 2004.

Histoire des variétés cultivées en France

La diversité des formes et de la physiologie est très grande, elle reflète la multiplicité des marchés. Le terme de cycle correspond ici à la période entre le semis et la récolte de la pomme.

Chou-fleur

Les variétés sont classées selon la durée du cycle allant de la plantation à la récolte (très précoce si la durée du cycle est de 65 jours, précoce, intermédiaire et tardive si la durée du cycle est de 110 jours) et selon la saison de récolte.

Variétés anciennes (très cultivées au début du siècle)

Traditionnellement, on distingue deux grands groupes de chou-fleur :

- le groupe des choux-fleurs nord-européens, annuels, d'origine inconnue (peut-être italienne ou de l'est de la Méditerranée) : il s'agit de choux-fleurs d'été, cultivés un peu partout. Parmi eux, on peut citer des variétés populations anciennes comme '**Alpha**' d'origine néerlandaise, '**Le Cerf**' d'origine française, '**Malines**' d'origine belge ou '**Erfurt**' d'origine allemande. De ce dernier groupe est issu '**Nain extra-hâtif boule de neige**', très cultivé au début du XX^e siècle car se prêtant bien à la culture forcée sous châssis et à la production en primeur dans le midi de la France ;

- le groupe des choux-fleurs du nord-ouest de l'Europe, bisannuels, d'origine italienne. Ce groupe se subdivise en choux-fleurs d'automne comme '**Métropole**', '**Géant d'automne**' et '**Amélioré de Chambourcy**' et choux-fleurs hivernant ou d'hiver. À ce sous-groupe appartiennent :
 - les populations fermières bretonnes ainsi que :
 - '**Roscoff**', '**Angers**' et '**Saint-Malo**', cultivées en plein air dans le nord-ouest de la France ;
 - '**Lenormand à pied court**' (1865, Lenormand, maraîcher rue de Reuilly à Paris), variété population précoce et rustique, très cultivée dans la Région parisienne ;
 - '**Chou-fleur d'Alger**', variété population spécifique du sud de la France et d'Algérie.

Ce groupe de choux-fleurs cultivés en zones non gélives (Bretagne, Provence, sud du Royaume-Uni et Italie) représente la plus grande partie de la production française.

En outre, il existe en Italie une grande diversité de choux-fleurs à pomme verte lisse ou à massifs saillants et coniques (comme le Romanesco). Ce dernier type est actuellement en progression.

Variétés récentes

De la même façon que les variétés anciennes, les variétés récentes sont classées selon la saison de récolte.

1972, '**Flora Blanca**' (Zaadunie SG, Pays-Bas), variété population de chou-fleur d'été. Cette variété a été cultivée en France pendant environ dix ans, mais elle n'est plus cultivée, comme toutes les variétés populations précoces. Cette population est originale en raison de ses fleurs blanches (caractère à contrôle monogénique dominant), toutes les autres variétés étant à fleurs jaunes.

1972, '**Delira**' (Rijk Zwaan, Pays-Bas), variété population de chou-fleur d'été. d'automne précoce. C'est une amélioration de 'Flora Blanca' avec une pomme très blanche. Cette variété a été cultivée en France pendant environ dix ans.

1973, '**Barrier Reef**' (Southern Cross Seeds, Australie), variété population de chou-fleur d'origine australienne, d'hiver précoce. Elle a été cultivée en France pendant environ quinze ans.

1973, '**White Top**' (Sakata Seed, Japon), variété population de chou-fleur d'été et d'automne précoce. Elle a été très peu cultivée en France.

Les quatre variétés précédentes ont été beaucoup cultivées en France dans les années 1970, avant l'arrivée des premières variétés hybrides.

1975, '**Tolmu**' (Sakata Seed, Japon) une des premières variétés hybrides F₁ de chou-fleur d'été. Sa production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique. Elle n'a jamais été cultivée en France.

1981, '**Nannig**' (INRA, France), première variété hybride F₁ française de chou-fleur d'automne dont la production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1983, **‘Siria’** (Clause, France), première variété française hybride F_1 de chou-fleur d’été. La production de ses semences est basée sur l’auto-incompatibilité. Cette variété hybride de chou-fleur d’été a été très cultivée dans le sud de l’Europe pendant les années 1980-90.

1987, **‘Jakez’** (INRA, France / CERAFEL, France), première variété hybride F_1 de chou-fleur d’hiver à cycle long. La production de semences est basée sur l’utilisation d’une stérilité mâle nucléaire récessive monogénique. Cette variété est à l’origine de la forte diminution du coût de revient de la culture du chou-fleur d’hiver en Bretagne.

1989, **‘Fanch’** (INRA / CERAFEL, France), variété hybride F_1 de chou-fleur d’hiver qui se caractérise par sa blancheur et son homogénéité (la récolte peut parfois se faire en deux passages seulement). La production de semences est basée sur l’utilisation d’une stérilité mâle nucléaire récessive polygénique.

1990, **‘Aviso’** (Clause SP, France), variété hybride F_1 de chou-fleur d’été-automne remarquable pour son utilisation à la fois en frais et pour l’industrie. La production de semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique.

1995, **‘Nedeleg’** (INRA / CERAFEL, France), variété hybride F_1 de chou-fleur d’hiver, dont la rusticité est remarquable. La production de semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique.

1996, **‘Nominoé’** (INRA / CERAFEL, France), variété hybride F_1 de chou-fleur d’automne, dont la production de semences est basée sur une stérilité mâle nucléaire dominante monogénique. Elle a remplacé ‘Nannig’.

1997, **‘Jeff’** (INRA / CERAFEL, France), variété hybride F_1 de chou-fleur d’hiver, très rustique, très plastique, avec des pommes d’une qualité excellente durant toute la saison de production. C’est une des variétés les plus cultivées en Bretagne. La production de semences est basée sur l’utilisation d’une stérilité mâle nucléaire récessive.

1997, **‘Escale’** (Clause Semences, France), **‘Sérac’** (Graines Gautier, France) et 1998, **‘Memphis’** (Vilmorin, France), premières variétés hybrides F_1 mâles stériles de chou-fleur d’automne dont la production de semences est basée sur l’utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA » (*cf.* encadré p. 244).

1998, **‘Trévi’** (Clause Semences, France), première variété hybride F_1 de chou-fleur à pomme verte dont la production de semences est basée sur l’utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ».

1999, **‘Navona’** (Clause Semences, France) première variété hybride F_1 de chou-fleur de type Romanesco dont la production de semences est basée sur l’utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ».

2000, **‘Merwen’** (INRA / CERAFEL / OBS, France), variété hybride F_1 de chou-fleur d’hiver, dont l’un des deux parents est issu d’haplodiploïdisation. La production de semences est basée sur l’utilisation d’une stérilité mâle nucléaire récessive.

2000, '**Ourasis**' (Vilmorin, France) première variété hybride F₁ mâle stérile de chou-fleur d'hiver tolérante à la maladie du feuillage due au champignon *Mycosphaerella brassicicola*.

2005, '**Sunset**' (Clause Tézier, France), première variété hybride F₁ de chou-fleur à pomme orange. La production de semences est basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique.

Chou brocoli

Les variétés sont classées selon la durée du cycle allant de la plantation à la récolte (très précoce si la durée du cycle est de 65 jours, précoce, semi-tardive et tardives si la durée du cycle est de 110 jours) et selon la saison de récolte.

Variétés anciennes

À **jets verts calabrais**, variété population fermière italienne, à tête en forme d'éperon (type *spear*), à faible densité de fleurettes, à grain plutôt grossier et à tige fine. C'est une variété précoce.

Variétés récentes

Le chou brocoli moderne n'a qu'un lointain rapport avec le chou brocoli à jets. La variabilité d'origine subsiste, mais elle est très peu utilisée. Les variétés modernes de chou brocoli ont des jets très denses et de calibre supérieur.

1989, '**Shogun**' (Sakata Seed, Japon), variété hybride F₁. Cette variété a apporté une morphologie nouvelle se caractérisant par une forme de tête hémisphérique compacte (type *crown*). Cette amorce de changement a été un tremplin pour la variété 'Marathon'. 'Shogun' est une variété tardive de printemps et d'automne. Sa production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1991, '**Marathon**' (Sakata Seed, Japon), variété hybride F₁, se caractérisant par une forme de tête hémisphérique compacte (type *crown*) et une grande plasticité apportant des performances régulières. Sa production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique. Cette variété semi-tardive de printemps et d'automne a marqué un véritable tournant dans les variétés de chou brocoli et a réellement dominé le marché au niveau mondial, dans les années 1990.

2000, '**Chevalier**' (Asgrow Seed, États-Unis), variété hybride F₁, possédant une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique. Elle est proche de 'Marathon' pour la morphologie de la pomme, mais avec moins de drageons et pour le cycle de culture. Elle est résistante au mildiou des Crucifères.

2000, '**Tambora**' (Clause Semences, France), première variété hybride F₁ de chou brocoli portant la stérilité mâle cytoplasmique « Ogu-INRA ». Les deux parents sont issus d'haplodiploïdisation. Cette variété, semée au printemps, a une précocité moyenne : elle est plus tardive de 10-12 jours que 'Marathon'. Sa pomme n'a pas de drageons latéraux.

2001, '**Monopoly**' (Syngenta Seeds BV, Pays-Bas), variété hybride F₁, possédant une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique. Cette variété, semée à l'automne, a une précocité moyenne.

2001, '**Monaco**' (Syngenta Seeds BV, Pays-Bas), variété hybride F₁, possédant une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique. Cette variété, semée à l'automne, a une précocité moyenne et une bonne productivité.

2003, '**Iron man**' (Asgrow Seed, États-Unis), variété hybride F₁, possédant une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique. Elle est plus tardive de 5 jours que 'Marathon' avec un poids de pomme plus élevé et une moindre sensibilité à la « tige creuse » (nécrose interne de la tige résultant d'une carence en bore).

Choux pommés

Les choux pommés sont des plantes possédant une grande variété de couleurs, de formes et de tailles de feuilles. Les variétés sont en général classées selon la saison de maturité de la pomme. C'est ainsi que quatre catégories ont été établies :

- le chou cabus blanc de printemps. Les variétés les plus précoces et les plus résistantes à la montée à graines, dans cette catégorie, sont des choux à pomme de forme pointue : 'Pointu de Chateaurenard', 'Précoce de Louviers', 'Pointu de Douarnenez' ;
- le chou cabus blanc et de Milan d'été et d'automne. Les choux cabus dans leur ensemble sont gélifs, ils doivent donc être récoltés avant les premières gelées ;
- le chou cabus blanc et de Milan d'hiver. Seuls, certains choux de Milan sont résistants au froid et peuvent être récoltés durant tout l'hiver : 'Roi de l'hiver', 'De Pontoise' ;
- le chou cabus rouge d'été et d'automne. Comme les autres choux cabus, ils sont gélifs.

Variétés anciennes

Près de 250 variétés populations étaient répertoriées en France au début du siècle. Parmi elles, on peut citer :

'**Nantais hâtif**' (ou '**Nantais colas**'), variété population améliorée de chou cabus de printemps, à pomme pointue, très dure.

'**Cœur de bœuf moyen de la halle**' (ou '**Cœur de bœuf des Vertus**'), variété population améliorée de chou cabus de printemps, à pomme pointue, très ferme. Cette variété très précoce est intéressante car elle monte moins vite à graines que les autres variétés de chou de printemps. De ce fait, elle peut être semée à l'automne pour une production primeur de printemps.

'**Bacalan gros**' (ou '**Tardif de Saint-Brieuc**'), variété population améliorée de chou cabus de printemps à pomme oblongue, peu dense.

'**Marché de Copenhague**', variété population améliorée de chou cabus d'été précoce à pomme ronde. Son cycle de 60-70 jours permet une récolte à la fin du printemps et au début de l'été. Le poids de la pomme varie de 1,5 à 3 kg.

‘Acre d’or’, variété population améliorée de chou cabus d’été très précoce à pomme de petit volume et très dense.

‘Très hâtif de la Saint-Jean’, variété population améliorée de chou de Milan d’été très précoce, à pomme oblongue vert pâle. Son feuillage typique d’un chou de Milan est cloqué en raison d’un grand développement du parenchyme foliaire entre les nervures.

Dès le XIII^e siècle, **‘Quintal d’Alsace’** (ou **‘Quintal de Strasbourg’**), variété population améliorée de chou cabus blanc d’automne, rustique et productive, mais assez hétérogène avec des dates de maturité échelonnées. La pomme de grande dimension, plate et fragile peut dépasser 20 kg. Elle possède des caractéristiques adaptées à la fabrication de la choucroute, en particulier une feuille fine et blanche.

‘Hâtif d’Aubervilliers’, variété population améliorée de chou de Milan d’automne, à grosse pomme aplatie. Cette variété était traditionnellement très appréciée sur les marchés parisiens.

‘De Pontoise’, variété population améliorée de chou de Milan d’hiver, à pomme ronde, ferme et légèrement rougeâtre. Fortement anthocyanée, sa coloration s’accroît avec les premières gelées. Elle est assez résistante au froid, contrairement à la plupart des variétés de chou de Milan.

Variétés récentes

Chou cabus blanc

1973, **‘Hidena’** (Bejo Zaaen, Pays-Bas), variété hybride F₁ de chou cabus blanc de type hollandais (la pomme est elliptique large), adaptée à la conservation. C’est une variété d’automne tardive. La production de ses semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique.

1973, **‘Mascotte’** ou **‘Breco’** ou **‘Progress’** (Sakata Seed, Japon), variété hybride F₁ de chou cabus d’été précoce. la production de ses semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique.

1973, **‘Tête de pierre’** ou **‘Stonehead’** ou **‘Roi des précoces’** (Sakata Seed, Japon), variété hybride F₁ de chou cabus d’été précoce d’origine japonaise. La production de ses semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique. Le nombre de plantes consanguines (*inbreds*) dans les lots de semences est très faible. Cette variété très connue est largement cultivée en raison de sa grande adaptabilité vis-à-vis du sol et du climat. C’est, aujourd’hui, une variété de référence pour le marché des plants pour le jardinier amateur.

1984, **‘Onyx’** (Clause, France), variété hybride F₁ de chou cabus de forme pointue. La production de ses semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique.

1987, **‘Baron’** (Clause, France), variété hybride F₁ de chou cabus d’hiver précoce. La production de ses semences est basée sur l’auto-incompatibilité pollinique.

1990, **'Marquis'** (Clause SP, France), variété hybride F₁ de chou cabus d'automne tardive pour la conservation. Les pommes sont récoltées en octobre et conservées en chambre froide en conteneurs de type « pallox » à 2-4 °C et ceci éventuellement jusqu'aux mois de juin ou juillet de l'année suivante. La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1990, **'Fanion'** (Clause SP, France), variété hybride F₁ de chou cabus de fin d'été. La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1996, **'Consul'**, **'Troubadour'** (Clause Semences, France), premières variétés hybrides F₁ de chou cabus blanc dont la production de semences est basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ». Ce sont des variétés précoces dont la pomme présente un éclatement tardif. 'Troubadour' est la version mâle stérile de la variété 'Doge' (1994).

2004, **'Tekila'**, **'Kilafur'**, **'Kilaton'** et **'Kilaxy'** (Syngenta Seeds BV, Pays Bas), premières variétés de chou cabus pour le marché de frais ou une conservation plus ou moins longue présentant un niveau de résistance à la hernie des Crucifères, équivalent à celui existant déjà chez le chou chinois.

Chou cabus rouge

1976, **'Aurore'** (Bejo Zaaften, Pays-Bas), variété hybride F₁ de chou cabus rouge d'automne pour la conservation. Sa production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1997, **'Redsky'** (Clause Semences, France) première variété hybride F₁ de chou rouge dont la production de semences est basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ». C'est une variété d'été précoce à pomme aplatie. Elle a un cycle de 80 jours et est résistante au *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* race 1.

Chou cabus pour l'industrie (ou chou à choucroute)

1975, **'Hitoma'** et 1976, **'Hinova'** (Bejo, Pays-Bas), variétés de type hybride F₁ dont la production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique. Elles se distinguent par une bonne productivité et une grande homogénéité. La pomme est ronde, avec une feuille épaisse ; elle est bien adaptée à la récolte mécanique, mais possède des qualités moyennes pour la fabrication de la choucroute.

1987, **'Casquedor'** (INRA, France / Semchoux, France), variété hybride F₁, dont la production de semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique. Elle montre une bonne productivité, sa récolte est mécanisable et elle permet de produire une choucroute de bonne qualité en raison de la finesse de sa feuille. C'est un hybride entre une population alsacienne traditionnelle à pomme plate et à feuille fine et le type néerlandais à pomme ronde et à feuille épaisse.

1993, **'Bouldor'** et **'Neuropa'** (Semchoux, France / INRA, France), variétés hybrides F₁ mâles stériles qui combinent les caractéristiques de qualité des variétés populations traditionnelles d'Alsace avec une meilleure homogénéité et

stabilité. Leur production de semences est basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ».

Chou de Milan

1973, '**Savoy king**' ou '**Roi des Milans**' ou '**Reglo**' (Sakata Seed, Japon), variété hybride F_1 de chou de Milan d'été. La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1975, '**Hiversa**' (Bejo Zaaen, Pays-Bas), variété hybride F_1 de chou de Milan d'hiver. La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1975, '**Wirosa**' (Bejo Zaaen, Pays-Bas), variété hybride F_1 de chou de Milan d'hiver. La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1988, '**Alaska**' (Syngenta Seeds, Pays-Bas), variété hybride F_1 de chou de Milan d'hiver. La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité pollinique.

1995, '**Rigoletto**' (Clause SP, France), première variété hybride F_1 de chou de Milan d'hiver dont la production de semences est basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ». C'est une variété tardive pour une récolte de décembre à janvier qui présente une bonne résistance vis-à-vis du froid. La pomme est ronde et à feuille cloquée très fine.

Chou intermédiaire entre cabus blanc et Milan

1975, '**Celsa**' (Bejo, Pays-Bas), variété hybride F_1 . La production de ses semences est basée sur l'auto-incompatibilité. Dans cet hybride chou cabus $\times$ chou de Milan, le chou cabus apporte la densité de pomme et le chou de Milan la résistance au froid.

Remarque. L'utilisation des hybrides F_1 a conduit à une réduction du nombre de variétés populations utilisées et les populations fermières ont pratiquement disparu.

Regard sur 50 ans de sélection

Entre les années 1970 et les années 1980, a eu lieu le passage des variétés populations fermières de chou-fleur aux variétés populations améliorées, ce qui s'est traduit par une homogénéisation des peuplements entraînant une réduction des pertes au champ et une amélioration de la qualité du produit. La réelle révolution a eu lieu ensuite avec le passage aux variétés hybrides F_1 auto-incompatibles, puis aux variétés hybrides F_1 mâles stériles.

Actuellement, les deux systèmes de contrôle de l'hybridation coexistent, l'utilisation de l'un ou l'autre dépendant de la stratégie de l'obteneur. La stérilité mâle a tout de même l'avantage d'éviter la présence de plantes consanguines

dans le champ (un chou repiqué occupe beaucoup de place et, s'il n'est pas récoltable, c'est une perte) et d'assurer la protection des lignées femelles (dans le cas de l'auto-incompatibilité, elles sont commercialisées avec les semences de l'hybride et donc disponibles pour les concurrents).

La gamme de variétés hybrides F_1 n'est pas complète et les populations, quoiqu'en forte régression (notamment pour les productions tardives d'hiver), sont encore utilisées.

La sélection privée est active tant en France qu'en Europe, au Japon et en Australie. Les principaux obtenteurs sont néerlandais (Syngenta Seeds BV, Bejo Zaden BV, Seminis Vegetable Seeds) et japonais (Takii and Co Ltd, Sakata Seed).

Pour le chou brocoli, des variétés hybrides F_1 d'origine étrangère (Japon et États-Unis), avec une production de semences basée sur l'auto-incompatibilité étaient déjà disponibles lorsque le développement de cette culture s'est amorcé en France.

Actuellement, la création variétale est pratiquée essentiellement en Asie (Japon, Corée), mais elle l'est également aux États-Unis et en Europe (France, Pays-Bas).

Pour les choux pommés, avant 1970, seules des variétés populations améliorées étaient cultivées. Dans les années 1970, des variétés hybrides F_1 , d'origine japonaise ou néerlandaise, plus productives et homogènes dont la production de semences était basée sur l'auto-incompatibilité, ont supplanté les variétés populations. Des variétés hybrides françaises de type hybride F_1 , dont la production de semences a d'abord reposé sur le recours à l'auto-incompatibilité, puis sur la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique ont été disponibles. Le passage aux variétés hybrides F_1 remplaçant les variétés populations a eu lieu plus tôt que dans le cas du chou-fleur pour des raisons essentiellement techniques.

Caractères importants améliorés

Chou-fleur

Rendement. Les variétés hybrides F_1 de chou-fleur apportent une augmentation du rendement de l'ordre de 40 % grâce à une réduction des pertes et une augmentation de l'homogénéité, par rapport aux variétés populations d'hiver. La densité de plantes au champ n'a pas changé, c'est le taux de récolte qui a augmenté.

Homogénéité. Il fallait de 8 à 12 passages pour récolter les pommes des variétés populations, 3 à 5 étaient nécessaires avec la première variété hybride. Cela s'est traduit par un gain de 30 à 40 % sur les frais globaux de culture. La récolte demeure manuelle. La sélection a permis de baisser les coûts de production. Par contre, le prix du chou-fleur n'a pas augmenté. L'intérêt principal de la stérilité mâle est de pouvoir obtenir des lots de semences exempts de semences issues d'autofécondation, alors qu'avec l'auto-incompatibilité, des taux de 5 à 10 % sont fréquents. Ceci conduit à une homogénéité remarquable en production.

Qualité du produit. La qualité, qui comprend pour la pomme, un grain fin, une absence d'anomalies physiologiques de la surface (bractée, « mousse »), une teinte couleur blanc pur et une bonne couverture (grâce au feuillage plaqué sur la pomme assurant une protection vis-à-vis du soleil, du gel et des ravageurs) et pour les fleurons, une densité et une fermeté suffisantes, a été aussi améliorée. Le taux de plantes récoltées varie désormais de 70 à 95 %.

Échelonnement de la période de récolte. La diversité génétique a été exploitée pour créer des gammes de précocité de récolte permettant de fournir le produit frais toute l'année.

Chou brocoli

Forme de tête hémisphérique compacte (*crown*). On note une considérable évolution de la forme de la tête (pomme) qui est passée du type éperon ou *spear* (destiné à l'industrie : purée et congélation) au type compact ou *crown* (marché de frais). Le type compact repose sur une base génétique très étroite. Ses atouts sont le volume, la fermeté et la densité des fleurettes, ce qui se traduit par un meilleur rendement et une meilleure conservation.

Qualité agronomique. Le changement de type de plante, c'est-à-dire du brocoli à jets au brocoli « monotête » s'est traduit par une évolution significative du poids des jets à celui d'une pomme : de quelques dizaines de grammes à 500 grammes. Des gains importants ont également été obtenus dans la qualité, l'homogénéité et le rendement du fait de la création de variétés de type hybride F₁.

Caractéristiques de la pomme. La finesse du grain (le grain désigne la taille du bouton floral) ainsi que sa couleur sont des caractéristiques importantes pour l'obtention d'une pomme de haute qualité. La densité et fermeté des fleurettes ainsi que la réduction de la proportion de tige par rapport à l'ensemble de la pomme et l'amélioration de la tendreté de la fleurette sont des caractères pris en compte en sélection, car ils conditionnent la proportion consommable de la pomme.

Choux pommés

Homogénéité. Le passage aux variétés hybrides a surtout apporté la régularité à différents niveaux : homogénéité de la forme et du calibre du chou, régularité de la qualité de la structure interne du chou et homogénéité de la date de maturité de la pomme (les dates de récolte ne sont plus échelonnées).

Aptitude à la mécanisation de la récolte du chou d'industrie. Outre l'homogénéité des plantes produites, le passage à une forme plus ronde ou ronde-plate et la résistance à l'éclatement de la pomme ont permis de mécaniser la récolte.

Qualité choucroutière. La densité de la pomme et la finesse des nervures sont des caractères très importants. La sélection de types de plantes à feuilles fines et tendres et à petites côtes a contribué à assurer une choucroute d'excellente qualité, c'est-à-dire longue, fine et blanc jaunâtre. Une telle choucroute résulte,

La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA »

La stérilité mâle cytoplasmique décrite par le Japonais H. Ogura dans la variété-population japonaise ‘Kubora-riso’ de radis (*Raphanus sativus* L.) en 1968 a été transférée par croisements interspécifiques chez le chou pommé par l’INRA. Les plantes obtenues étaient mâles stériles, mais présentaient une déficience chlorophyllienne, s’exprimant à basse température, qui les rendaient incultivables.

Des fusions de protoplastes (procédé breveté) ont permis de corriger cette déficience en donnant des plantes « cybrides », mâles stériles et ayant une bonne activité chlorophyllienne. Ces plantes associent, en effet, dans un même cytoplasme hybride, des génomes chloroplastique et nucléaire de chou à un génome mitochondrial recombiné radis-chou (brevet « Ogu-INRA »). Ce travail a été réalisé grâce une convention de recherches entre l’INRA et les principaux sélectionneurs français de chou (Desprez Veuve et Fils, Graines Gautier, Vilmorin et Clause Semences) à la fin des années 1980. Les premières variétés hybrides F₁ mâles stériles de chou ont été inscrites en 1993.

De nombreuses variétés hybrides de tous les cultigrades de chou, aussi bien potagers que fourragers, portant cette stérilité mâle, ont été commercialisées depuis.

en fait, nécessairement d’un compromis entre la qualité choucroutière (feuille fine) et des qualités agronomiques (résistance de la pomme à l’éclatement et aptitude à la récolte mécanique).

Méthodes utilisées

MÉTHODES D’INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Des allèles de stérilités mâles nucléaires du chou-fleur d’hiver. Certaines sont dominantes (rares) (‘Nominoé’) et d’autres sont récessives (fréquentes) (‘Jeff’). Plusieurs caractères, comme les résistances à certaines maladies (mildiou des Crucifères et alternariose due à <i>Alternaria brassicicola</i>) sont mono- ou oligogéniques.
Mutagenèse induite	ESSAIS En Allemagne, une stérilité mâle nucléaire a été induite à l’aide de MSE.
Croisements intraspécifiques et interspécifiques	OUI La possibilité de croiser les nombreux cultigrades de l’espèce <i>Brassica oleracea</i> entre eux est une source importante de variabilité. OUI Des Japonais ont réalisé des croisements interspécifiques entre un chou pommé et un chou chinois pet-saï (<i>B. rapa</i> subsp. <i>pekinensis</i>) pour obtenir un colza <i>B. napus</i> L. formant une « pomme ». Ce nouveau légume a été nommé « Hakuran ». En 1968, des croisements entre un chou pommé et un radis japonais ‘Kubora-riso’ (<i>Raphanus sativus</i>) ont permis d’introduire une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique Ogura. La culture d’embryons <i>in vitro</i> a été nécessaire (cf. encadré ci-dessus).

suite...

... suite

Des croisements entre chou pommé porteur de la stérilité mâle Ogura et un colza fertile ont permis d'introduire cette stérilité mâle nucléo-cytoplasmique chez le colza.

Des croisements entre les choux pommés, les choux-fleurs, les choux de Bruxelles et le pé-tsaï (chou chinois) ont permis d'introduire la résistance à la hernie des Crucifères.

Hybridation somatique

OUI

Des fusions de protoplastes ont été réalisées pour corriger l'absence de nectaires et la déficience chlorophyllienne des plantes mâles stériles Ogura de chou pommé, conduisant à l'obtention de plantes mâles stériles viables à basses températures (*cf.* encadré ci-contre) [chou-fleur ('Escale', 'Sérac', 'Memphis') ; chou brocoli ('Tambora', 'Monopoly') ; choux pommés ('Bouldor', 'Régent', 'Consul', 'Troubadour')].

Élévation du niveau de ploïdie

NON

Un chou tétraploïde a une feuille coriace et est peu fertile.

Transgénèse

ESSAIS

1^{res} plantes transformées. La transgénèse a été réalisée la première fois sur *Brassica oleracea* en 1995.

Aux États-Unis, plus de dix essais au champ avaient été effectués en 2000.

Caractères introduits. Les transgènes introduits sont une stérilité mâle nucléaire, des tolérances à des herbicides, des résistances à des insectes lépidoptères, à des champignons ou à un virus ainsi que l'aptitude à une longue conservation. Aucune variété transgénique n'est commercialisée.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative

OUI

Dans le cas du chou-fleur, le bouturage horticole et la culture de fragments de pomme (méristèmes préfloraux) *in vitro* sont utilisés pour multiplier les parents de variétés hybrides F₁ basées sur l'auto-incompatibilité ou sur une stérilité mâle nucléaire ('Jeff', 'Melar', 'Nedeleg'). Cette technique est aussi beaucoup utilisée en cours de sélection.

La multiplication végétative permet, par ailleurs, d'utiliser comme parent d'hybride une plante dont les caractères ne sont pas complètement fixés (hybride de clones).

Dans le cas du chou brocoli, le bouturage horticole est pratiqué pour multiplier végétativement les parents de certaines variétés hybrides.

ESSAIS

Dans le cas des choux pommés, les essais de multiplication *in vitro* ont conduit à l'obtention d'environ 25% de plantes tétraploïdes.

Sélection sanitaire

OUI

La culture de méristèmes préfloraux permet d'éliminer les virus (virus de la mosaïque du navet, *Turnip mosaic virus*, Tu-MV et virus de la mosaïque du chou-fleur, *Cauliflower mosaic virus*, CaMV) des parents des variétés hybrides de chou-fleur et de chou brocoli.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	OUI Stérilité nucléaire récessive ou dominante ('Jeff', 'Nominoé'). Stérilités nucléo-cytoplasmiques : stérilité Ogura, provenant de <i>Raphanus sativus</i>, corrigée par hybridation somatique (système « Ogu-INRA » notamment [chou-fleur ('Escale', 'Sérac', 'Memphis') ; chou brocoli ('Tambora', 'Monopoly') ; choux pommés ('Bouldor', 'Régent', 'Consul', 'Troubadour')].
Haploïdisation	OUI La culture de microspores isolées et la culture d'anthères <i>in vitro</i> sont utilisées pour obtenir des lignées pour la réalisation d'hybrides (chou-fleur 'Merwen', chou brocoli 'Tambora').
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Une auto-incompatibilité pollinique, de type sporophytique, a été beaucoup exploitée pour la production de semences de variétés hybrides F₁. Cette méthode permet de diffuser rapidement de nouvelles variétés et offre la possibilité de récolter des semences éventuellement sur les deux parents. Par contre, il peut être un peu difficile de gérer les allèles et le système est partiellement défaillant (5%, et souvent davantage, d'autofécondation) dans certaines conditions environnementales (chou-fleur 'Tolmu', 'Nannig', 'Aviso' ; chou brocoli 'Shogun', 'Marathon' ; choux pommés 'Hidena', 'Mascotte', 'Baron', 'Autoro', 'Inhova', 'Casquedor', 'Savoy King', 'Wirosa', etc.). Des travaux sont conduits au Japon pour améliorer ce système chez les <i>Brassica</i> spp.
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires sont utilisés, pour l'ensemble des choux, pour le contrôle de la qualité des semences (pourcentage de plantes consanguines ou <i>inbreds</i>) et l'identification variétale. Ils sont utilisés, en outre, – dans le cas du chou-fleur, pour le marquage de gènes de résistance et de stérilité mâle, la détection de génotypes en double (doublons) dans les ressources génétiques et l'évaluation de la diversité et des distances génétiques entre cultigrupes (depuis 1996) ; – dans le cas du chou brocoli, pour la conduite de rétrocroisements pour convertir des lignées en version mâle stérile et pour la recherche de généalogies (tests de paternité, plantes hors type) ; – dans le cas des choux pommés, pour la sélection assistée par marqueurs pour accélérer les rétrocroisements.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Dans le cas du chou-fleur : – sélection généalogique massale maternelle pour l'amélioration des populations fermières et leur stabilisation et pour la création de lignées parentes d'hybride, – haplométhode, puis choix des meilleures combinaisons hybrides. Dans le cas du brocoli : – sélection généalogique pour la création de lignées parentales, – haplométhode, puis choix des meilleures combinaisons hybrides. Dans le cas des choux pommés : – sélection conservatrice pour les populations fixées, – sélection généalogique.

suite...

... suite

Types variétaux

Variété population fermière**Variété population améliorée**, c'est-à-dire variété population dont les caractères sont fixés et qui est maintenue par sélection conservatrice.**Variétés hybrides :**

- **hybride de clones** (entre deux parents hétérozygotes),
- **hybride (clone × lignée)**,
- **hybride F₁**, avec différentes possibilités de contrôle de l'hybridation :
 - auto-incompatibilité de type sporophytique,
 - stérilité mâle nucléaire récessive,
 - stérilité mâle nucléaire dominante,
 - stérilité mâle nucléo-cytoplasmique.

Perspectives d'amélioration

Les principales améliorations apportées ces dernières années ont concerné l'homogénéité des variétés en vue de réduire les coûts de production. Les caractéristiques technologiques ainsi que les caractères adaptatifs en vue de produire toute l'année restent une préoccupation majeure des sélectionneurs.

Pour la décennie à venir, les résistances aux insectes, aux bactéries, champignons et virus seront de la plus grande importance afin de réduire l'utilisation de pesticides.

La voie hybride est maintenant bien appréciée, le sélectionneur pourra alors, en utilisant les résultats de la génomique, introduire des résistances génétiques à ces différents parasites dont l'importance est variable en fonction des zones de production.

Caractères à améliorer

Chou-fleur

Tolérance aux maladies et aux insectes. Ne pouvant répondre actuellement à l'ensemble des problèmes parasitaires par une résistance génétique spécifique pour chaque parasite, l'objectif est de proposer des variétés vigoureuses. Les problèmes de désherbage et de maladies étant très réduits chez le chou-fleur d'hiver, on peut le cultiver en agriculture biologique et le rendement est souvent équivalent.

Hernie des Crucifères. L'introduction d'une résistance génétique à la hernie des Crucifères, causée par un champignon du sol (*Plasmodiophora brassicae*), est très souhaitable, aucun moyen de lutte chimique ne pouvant contrôler cette maladie très présente (80 % des sols sont infestés en Bretagne).

Maladies du feuillage et de la pomme. La maladie des taches noires annulaires due au champignon *Mycosphaerella brassicicola* et le mildiou des Crucifères dû à *Peronospora parasitica*, sont également importantes, ainsi que des maladies bactériennes, en particulier la nervation noire des Crucifères due à *Xanthomonas*

campestris et transmissible par la semence et de pourriture molle de la pomme causée par *Pectobacterium carotovorum* (anciennement *Erwinia carotovora*), bactérie opportuniste pectinolytique également transmissible par la semence. Des possibilités de lutte génétique sont ici entrevues en raison de la variabilité du comportement des variétés à l'intérieur de l'espèce *B. oleracea*.

Insectes. Des insectes (la mouche du chou, *Delia radicum*, des chenilles telles que celle de la piéride du chou, *Pieris brassicae*, ou de la noctuelle du chou, *Mamestra brassicae*...) sont fréquemment rencontrés dans les cultures. La teigne du chou (*Plutella xylostella*) est également un problème très important ainsi que l'ensemble des pucerons en production de semences. Aucune résistance génétique n'a été détectée dans l'espèce vis-à-vis de ces bio-agresseurs. La protection des plants par un voile en pépinière limite l'impact de la mouche du chou aux jeunes stades. La lutte biologique est également expérimentée pour cette dernière ainsi que pour la teigne du chou.

Qualité du produit. Le consommateur souhaite une pomme de chou-fleur entièrement blanche, car il associe la blancheur de l'inflorescence à un état de fraîcheur du produit. Il serait possible d'améliorer encore ce caractère et les programmes de sélection en tiennent compte. Il existe du matériel génétique d'origine nord-américaine qui reste blanc, malgré l'exposition de la pomme à la lumière.

Couverture totale du calendrier de production. Avec certains types d'hiver, on peut récolter jusqu'en mai. Cependant, la qualité du produit récolté n'est pas entièrement satisfaisante. Il faut créer des variétés donnant un produit de qualité pour la période mai-juin.

Contrôle des plantes hors type. Des études précises, dans le cadre de l'inscription au catalogue officiel, ont montré que certaines variétés hybrides récentes pouvaient présenter des plantes aberrantes (2 à 30 % de plantes aberrantes ont été détectées selon les variétés tant issues de l'auto-incompatibilité que d'une stérilité mâle). L'origine de ces plantes est en cours d'étude dans un programme à l'initiative du CTPS, par l'INRA et les obtenteurs privés). Les premiers résultats suggèrent une origine épigénétique et montrent qu'il existe, en effet, une variabilité génétique forte pour la sensibilité à exprimer. Ce caractère n'est d'ailleurs pas spécifique au chou-fleur, puisqu'on le rencontre chez l'ensemble des choux de l'espèce *Brassica oleracea* (et même chez la plupart des espèces cultivées), à une fréquence faible généralement inférieure à celle du chou. L'objectif est de pouvoir sélectionner les lignées ou les groupes de variétés moins sensibles à cette « aberration ».

Teneur en glucosinolates. Le chou-fleur, comme les autres choux, contient des substances originales, les glucosinolates qui suscitent actuellement un grand intérêt en raison de leur incidence potentielle sur la santé. Il n'est pas exclu de travailler l'amélioration de la teneur en ces substances.

Aptitude à la mécanisation de la récolte. Ceci exigera d'avoir des variétés à production très groupée. C'est un objectif plus difficile à atteindre chez le chou-fleur que chez le chou brocoli ou les choux pommés.

Chou brocoli

Aptitude à la conservation. Des pourritures bactériennes (*Pseudomonas syringae* et *Xanthomonas campestris*) et la perte d'eau déprécient le produit frais.

Aptitude à la transformation industrielle. Il faut créer des variétés spécialement adaptées à la transformation industrielle, c'est-à-dire ayant des fleurettes de forme et de calibre réguliers et denses avec un bon rendement fleurettes/pomme. Une couleur plus foncée, sans zone dépourvue de chlorophylle est également recherchée.

Tolérance aux bio-agresseurs (cf. chou-fleur).

Qualité de la pomme. Il est nécessaire de sélectionner des plantes ayant un tronc plein sans drageons latéraux et jets, une pomme dense à branchettes épaisses, et à fleurettes à grain fin et régulier sans oublier un fort potentiel de pommes de calibre élevé.

Choux pommés

Tolérances aux maladies et aux insectes. La finesse des feuilles et leur structure tendre qui sont des caractères indispensables pour obtenir une pomme de qualité, sont en même temps des caractères qui induisent chez la plante une plus grande sensibilité aux maladies.

Les principaux parasites des choux pommés sont, par ordre d'importance décroissante, des bactéries : *Xanthomonas campestris* (agent de la nervation noire des Crucifères), *Pseudomonas syringae*, *Erwinia carotovora* (agent de la pourriture pectinolytique), des champignons tels que *Plasmodiophora brassicae* (agent de la hernie des Crucifères), *Alternaria* sp. et *Mycosphaerella brassicicola* (agents des maladies des taches noires) et *Peronospora parasitica* (agent du mildiou des Crucifères) et des insectes tels que la mouche du chou, les pucerons et la teigne du chou. En 2004, les quatre variétés de chou cabus, résistantes à la hernie des Crucifères, ont été commercialisées. Des programmes sont en cours pour introduire cette résistance provenant du chou chinois, dans des hybrides de chou-fleur et de chou de Bruxelles.

Techniques à développer

L'haplodiploïdisation est maintenant utilisée car le gain de temps de sélection est très important. L'emploi de cette méthode se heurte cependant au fait que sa réactivité dépend du génotype.

Les tests pathologiques, disponibles pour la plupart des agents pathogènes, sont déjà très utilisés.

Le marquage moléculaire devient un outil très utile malgré le faible nombre de caractères monogéniques existant chez les choux.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, de rubriques particulières de variétés hybrides chez le chou-fleur ainsi qu'une dizaine d'autres espèces légumières.

1988, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de certification pour le chou brocoli.

1991, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés de chou brocoli.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2004, 151 variétés de chou-fleur, 13 variétés de chou brocoli, 59 variétés de chou cabus blanc, 30 variétés de chou de Milan et 8 variétés de chou rouge étaient inscrites au catalogue officiel français. Cette même année, 655 variétés de chou-fleur, 144 variétés de chou brocoli, 833 variétés de chou cabus blanc, 289 variétés de chou de Milan et 151 variétés de chou rouge au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Cette même année, 2 variétés de chou-fleur et 3 variétés de chou cabus étaient inscrites sur la liste variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 28 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés de chou-fleur, 31 dans le cas des variétés de chou brocoli, 32 dans le cas des variétés de chou cabus blanc, 34 dans le cas des variétés de chou de Milan et 33 dans le cas des variétés de chou rouge suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est d'un an, avec deux sites d'observation :

- Brion (Maine-et-Loire) et Cavaillon (Vaucluse) pour les variétés de chou-fleur d'été-automne, de chou brocoli et de choux pommés ;
- Brion et Saint-Pol-de-Léon (Finistère Nord) pour les variétés de chou-fleur d'hiver.

À l'issue de cette année d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur,

lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il faut signaler la protection, par brevet, du cytoplasme « Ogu-INRA » utilisé dans certaines variétés hybrides F₁.

Pour en savoir plus

APRIFEL, 1999. Brocoli. Dans : *Fiches nutritionnelles de référence*. APRIFEL, Paris, 2 p.

Baebeyron G. et Bourry S., 1998. Marker assisted selection in cauliflower : molecular mapping of a nuclear recessive male sterility gene. *Acta Hortic.*, 459, 149-156.

Bois D., 1927. *Brassica*. Dans : *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture Phanérogames légumières*. Ed. Paul Lechevalier, Paris, tome 1, 30-49.

Bannerot H., Bouldard L., Cauderon Y. et Tempé J., 1974. Transfer of cytoplasmic male sterility from *Raphanus sativus* to *Brassica oleracea*. *Proc. Eucarpia Crop Meeting*, Dundee, sect. *Cruciferae*, 52-54.

Carafa A.-M. et Carratu G., 1997. Stigma-treatment with saline solutions : a new method to overcome self-incompatibility in *Brassica oleracea* L. *J. Hortic. Sci.*, 72 (4), 531-535.

Chauvet M., 2005. Du chou à la choucroute : la saga d'un légume fermenté en Europe. Dans : *Les fermentations au service des produits de terroir*. M.-C. Montel, C. Béranger et J. Bonnemaire, (coord.), INRA Éditions, Paris, 65-71.

Chauvin J.-E., Yang Y., Lejeune B. et Hervé Y., 1993. Obtention d'embryons par culture d'anthères chez le chou-fleur et le brocoli et évaluation des potentialités du matériel obtenu pour la création variétale. *Agronomie*, 13, 579-590.

Chaux C. et Foury C., 1994. Chou pommé. Dans : *Productions légumières – tome 2 – Légumes feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes*. Éditions Lavoisier, Paris, 3-27.

Chaux C. et Foury C., 1994. Chou-fleur et chou brocoli. Dans : *Productions légumières – tome 2 – Légumes feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes*. Éditions Lavoisier, Paris, 57-100.

Chen L.F.O., Hwang J.Y., Chaeng Y.Y., Sun C.W. et Yang S.F., 2001. Transformation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) with isopentenyltransferase gene via *Agrobacterium tumefaciens* for post-harvest yellowing retardation. *Mol. Breed.*, 7 (3), 243-257.

Crisp P., 1982. The use of an evolutionary scheme for cauliflowers and the screening of genetic resources. *Euphytica*, 31, 725-734.

Darling D., Harling R., Simpson R A., Mc Roberts N. et Hunter E.A., 2000. Susceptibility of broccoli cultivars to bacterial head rot : in vitro screening and the role of morphology in resistance. *Eur. J. Plant Pathol.*, 106, 11-17.

Doré C. et Bouldard L., 1988. Production de plantes androgénétiques de chou à choucroute (*Brassica oleracea* L. ssp. *capitata*) par culture d'anthères *in vitro* : comportement des lignées haploïdes doublées (HD) et leur intérêt comme parents d'hybrides F₁. *Agronomie*, 8 (10), 851-862.

Duneman F. et Grunewalt J., 1991. Identification of a monogenic dominant male sterility mutant in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck). *Plant Breed.*, 106, 161-163.

Giles W.F., 1941. Cauliflower and broccoli *J. Roy. Hortic. Soc.*, 66, 265-278.

Gomez-Campo C. et Guftafsson M., 1991. Germplasm of wild *n* = 9 mediterranean species of *Brassica*. *Bot. Chron.*, 10, 429-434.

Gray A.R., 1989. Taxonomy and evolution of broccolis and cauliflowers. *Baileya*, 23 (1), 28-46.

Hervé Y., 1992. Les choux. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 435-447.

- Hervé Y.**, 2003. Choux. Dans : *Histoire de légumes. Des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 222-234.
- Jehanno D. et Le Guern J.**, 1999. Les légumes fermentés. Dans : *Technologie des légumes*. Y. Tirilly et C.M. Bourgeois, coord., Éditions Tec & Doc, Paris, 419-436.
- Laumonnier R.**, 1963. Les choux pommés. Dans : *Cultures maraîchères*. Éditions J.-B. Baillière et Fils, Paris, tome 2, 68-93.
- Laumonnier R.**, 1963. Les choux-fleurs et choux brocolis. Dans : *Cultures maraîchères*. Éditions J.-B. Baillière et Fils, Paris, tome 2, 94-116.
- Le Saint J.-P., Lejeune B., Chatelet P. et Hervé Y.**, 1995. Le programme de création variétale du brocoli. *Aujourd'hui et demain*, 49, 1-7.
- Levieil R.**, 1998. La stérilité mâle chez le chou-fleur. *PHM*, 388, 31-33.
- Maurizio A.**, 1932. *Histoire de l'alimentation végétale depuis la Préhistoire jusqu'à nos jours*. Trad. par F. Gidon. Paris, Payot, 664 p.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies des Crucifères. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 403-429.
- Metz T.D., Dixit R. et Earle E.D.**, 1995. *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) and cabbage (*B. oleracea* var. *capitata*). *Plant Cell Rep.*, 15 (3/4), 287-292.
- Nasrallah J.B.**, 1995. Complexity of the self-incompatibility genes of *Brassica*. *Acta Hortic.*, 392, 61-67.
- Nishi S.**, 1980. Differentiation of *Brassica* crops in Asia and the breeding of Hakuran, a newly synthesised leafy vegetable. Dans : *Brassica crops and wild allies*. S. Tsunoda, K. Hinata et C. Gomez-Campo, ed., Japan Sci. Soc. Press, Tokyo, 132-150.
- Ogura H.**, 1968. Studies on the new male sterility in japanese radish, with special references to the utilization of this sterility towards the practical raising of hybrid seeds. *Mem. Fac. Agric. Kagoshima Univ.*, (6) 2, 39-78.
- Pelletier G., Férault M., Lancelin D., Bouldard L., Doré C., Bonhomme S., Grelon M. et Budar F.**, 1995. Engineering of cytoplasmic male sterility in vegetable by protoplast fusion. *Acta Hortic.*, 392, 11-18.
- PengUILly D. et Estorgues V.**, 2005. Choux : comment raisonner la lutte contre le *Mycosphaerella* ? *Aujourd'hui et Demain*, 82, 19-21.
- Péron J.-Y.**, 1999. Le chou brocoli à jets. Dans : *Productions légumières, Références*, Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 228-232.
- Péron J.-Y.**, 1999. Le chou-fleur. Dans : *Productions légumières, Références*, Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 245-256.
- Péron J.-Y.**, 1999. Le chou pommé. Dans : *Productions légumières, Références*, Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 260-267.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Reynaerts A., Van de Wiele H., De Sutter G. et Janssens J.**, 1993. Phenotype modification by direct gene transfer : Engineered genes for fertility control and their application in hybrid seed production. *Sci. Hortic.*, 55, 125-139.
- Ruffio-Chable V., Hervé Y., Dumas C. et Gaude T.**, 1997. Distribution of S-haplotypes and its relationship with self-incompatibility in *Brassica oleracea*. Part 1. In inbred lines of cauliflower. *Theor. Appl. Genet.*, 94, 338-346.
- Ruffio-Chable V., Bellis H. et Hervé Y.**, 1993. A dominant gene for male sterility in cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis*). Phenotype expression, inheritance and use in F₁ hybrid production. *Euphytica*, 67 (1-2), 9-17.
- Ruffio-Chable V. et Hervé Y.**, 1999. Chou-fleur et brocoli. Dans : *Technologie des légumes*. Éditions Lavoisier, Paris, 187-206.

- Ruffio-Chable V., Chatelet P. et Thomas G.**, 2000. Developmentally « aberrant » plants in F₁ hybrids of *Brassica oleracea*. *Acta Hortic.*, 539, 89-94.
- Ruffio-Chable V. et Cadot V.**, 2000. Recherche : choux-fleurs, les plantes aberrantes. *Bull. Semences*, 156, 37-38.
- Voss Stern G.A., Ockendon D.J., Gabrielson R.L. et Maguerre J.D.**, 1982. Self incompatibility alleles in broccoli. *Hortscience*, 17 (5), 748-749.
- Waterer D., Lee S., Scoles G. et Keller W.**, 2000. Field evaluation of herbicide-resistant transgenic broccoli. *Hortscience*, 35 (5), 930-932.

Le colza

Brassica napus L. ($2n = 4x = 38$)
(Brassicacées ou Crucifères)

Présentation du cultigroupe

Le colza et le rutabaga sont deux cultigroupes qui appartiennent à la même espèce, *Brassica napus* L. Cette espèce amphiploïde issue de croisements naturels entre *B. oleracea* L. ($2n = 18$) et *B. rapa* L. subsp. *campestris* (L.) A. R. Clapham (anciennement *B. campestris* L.) ($2n = 20$) est apparue spontanément à plusieurs reprises, notamment au Moyen Âge en Flandres, dans des jardins où du chou (*Brassica oleracea*) était cultivé pour la consommation humaine à côté de la navette (*B. rapa*) servant à produire de l'huile d'éclairage ou du navet (*B. rapa*). Le colza aurait alors été sélectionné comme une navette capable de produire encore plus d'huile et le rutabaga comme un navet produisant des racines plus volumineuses. Dès le début du XIX^e siècle, A. Sageret réalisa des hybridations entre le chou et la navette et obtint une plante ayant les caractéristiques du colza. Cette hypothèse a été scientifiquement démontrée ensuite par l'analyse des génomes mitochondriaux et chloroplastiques : au moins quatre hybridations indépendantes sont à l'origine de *B. napus*. Les débuts de la véritable culture du colza en Europe datent probablement du XV^e siècle. Son histoire a ensuite suivi les aléas politiques des pays : en période de crise, le colza est une culture refuge. En 1862, environ 200 000 ha de colza étaient cultivés en France. Puis, les surfaces n'ont cessé de baisser, principalement à cause de l'importation d'huile d'arachide d'Afrique occidentale et d'huile d'olive de Tunisie. En 1939, la France importait la quasi-totalité de ses huiles puisque les cultures oléagineuses ne couvraient pas plus de 14 000 ha (dont 11 000 de colza). Avec la grande pénurie de matière grasse en France durant la seconde guerre mondiale et la disparition d'une source majeure d'huile après l'indépendance du Sénégal notamment, le développement de la culture de plantes oléagineuses, telles que le colza et le tournesol, est devenu prioritaire dans les années 1960.

B. napus est une espèce annuelle, semi-autogame présentant de l'ordre de 30 % de pollinisation croisée. Elle est multipliée par semences.

Le colza est une espèce récente créée par l'homme, dont le fond génétique est, par conséquent, assez étroit. Il existe deux grandes zones traditionnelles de culture en Europe et en Asie, une troisième plus récente est le Canada.

Il existe des collections de colza au Canada (AAC à Ottawa), aux États-Unis (universités La Fayette, Ames, Fort-Collins), en Allemagne (IPK à Gatersleben), en Pologne (IHAR à Poznan), en Russie (Institut Vavilov), en Espagne (à Cordoba), en Chine (à Wuhan,...), en Inde (à Ludhiana,...) et au Japon. En France, il existe un Centre de ressources biologiques associant l'INRA, le GEVES et les partenaires privés (environ 100 génotypes dans la collection nationale) situé à l'INRA de Rennes (Ille-et-Vilaine).

Production et utilisation

Le produit récolté est :

- soit la graine qui, après broyage, donne l'huile et le tourteau dans le cas du colza oléagineux. Les graines sont contenues dans une silique qui est un fruit sec et déhiscent à maturité ;
- soit la plante entière dans le cas du colza fourrager. Elle est broutée au stade végétatif ou fauchée en début de floraison.

Le colza est cultivé sur des surfaces importantes en Chine, au Canada, dans le nord de l'Europe et en Australie tandis qu'en Inde, il est cultivé à une moindre échelle comme la navette (la moutarde brune *B. juncea* (L.) Czern. y est, par contre, principalement cultivée). La production mondiale de graines de colza est proche de 46,3 millions de tonnes (données FAO, 2004). Le développement de la culture du colza au Canada, où il a été introduit pour assurer la fourniture d'huile mécanique pour les engins de guerre, est remarquable depuis 1942. Le Canada a été longtemps le premier producteur mondial. En 2004, la Chine (13 millions de tonnes), le Canada (7,7 millions de tonnes), l'Inde (6,8 millions de tonnes), l'Allemagne (5,3 millions de tonnes) et la France (4 millions de tonnes) étaient les producteurs les plus importants (données FAO, 2004).

Le colza a de multiples utilisations.

Nutrition humaine. L'huile de colza est majoritairement utilisée pour la consommation humaine. En France, seulement 9 % d'huile de colza est consommée sous forme d'huile de table, le reste entrant dans la composition de margarines et de certaines matières grasses destinées à l'industrie agroalimentaire (biscuiteries, fabricants de plats surgelés). Cette huile, avec moins de 10 % d'acides gras saturés (acide palmitique, stéarique,...), 60 % d'acide gras mono-insaturés (principalement oléique) et 30 % d'acides gras poly-insaturés (acide linoléique, α -linoléique), est particulièrement bien adaptée à l'alimentation humaine. Certaines variétés récentes ont été sélectionnées pour produire des huiles de différentes compositions. La teneur relativement élevée en acide α -linoléique de l'huile de colza limite son utilisation à

l'assaisonnement en huile pure. Elle peut, par contre, être combinée à d'autres huiles sans acide α -linoléique pour l'utilisation en friture.

Nutrition animale. Le tourteau est produit à partir des graines après l'extraction de l'huile du colza oléagineux. La réduction de sa teneur en glucosinolates a permis d'augmenter très significativement son utilisation en alimentation animale (ruminants et porc). Le colza fourrager, quant à lui, est d'une faible importance économique.

Usages industriels. En plus de son utilisation alimentaire, l'huile extraite du colza (et celle de la navette) ont longtemps été utilisées pour l'éclairage. Lorsque l'huile est riche en acide érucique, celle-ci sert à la fabrication de nombreux produits industriels tels que les lubrifiants ou les matières plastiques. Une huile riche en acide laurique pourrait être intéressante notamment pour la production de détergents. Par ailleurs, l'estérification de l'huile de colza par l'alcool méthylique conduit à la production d'ester méthylique appelé diester. Ce produit a plusieurs applications : bio-carburant principalement, mais aussi solvant et lubrifiant (*cf.* encadré ci-dessous).

Le diester

À l'origine, il s'agissait de diversifier les débouchés du colza. Dans les années 1970, l'Institut français du pétrole et la filière colza ont développé un programme innovant sur la fabrication et l'utilisation d'esters méthyliques d'huile végétale comme carburant pour les moteurs diesel de série. Ce programme a abouti à la mise au point du « diester » à partir de l'huile de colza (et à partir de l'huile de tournesol) : une tonne d'huile végétale + 0,1 t de méthanol donnent 1 tonne de diester + 0,1 t de glycérine. Le diester est un biocarburant qui peut être incorporé au gazole jusqu'à hauteur de 30 %, (optimum d'un point de vue environnemental).

Le diester présente plusieurs avantages par rapport au pétrole comme d'être non toxique, d'être biodégradable, renouvelable et d'avoir un impact favorable dans la lutte contre l'effet de serre. Ainsi, la consommation d'une tonne de diester permet d'économiser l'équivalent de 2,5 tonnes de CO₂ et un véhicule roulant avec un mélange de 30 % de diester + 70 % de gazole, réduit de 23 % ses émissions de gaz à effet de serre. En tant qu'énergie renouvelable et plus respectueuse de l'environnement que les carburants d'origine fossile, le diester est exonéré d'une partie de la taxe intérieure sur les produits pétroliers. Lancée au début des années 1990, la filière diester n'a cessé de se développer depuis, et en 2002, la production française de diester était de 365 000 tonnes. L'Allemagne pour la première fois en 2002 est devenu le premier producteur avec 440 000 tonnes. tandis que dans le monde, plusieurs pays gros producteurs d'huile végétale se lancent dans la production de bio-diesel (nom international du diester).

Bien que principalement utilisé comme bio-carburant, le diester a d'autres débouchés industriels : comme solvant, il a participé, par exemple, au nettoyage des plages souillées par la marée noire provoquée par le bateau *Erika* et a servi à fluidifier les milliers de tonnes de fioul lourd restées dans les cuves de l'épave. C'est également un lubrifiant.

Enfin, les coproduits de la fabrication du diester peuvent être valorisés : en plus du tourteau pour l'alimentation animale, la glycérine est très demandée par les industries agroalimentaires et cosmétiques.

Histoire des variétés cultivées en France

On distingue deux types de colza :

- le colza de printemps qui ne résiste pas au froid et qui fleurit sans avoir besoin d'une période de vernalisation ;
- le colza d'hiver qui résiste au froid et qui nécessite une période de froid vernalisante pour fleurir.

Colza oléagineux de printemps

Variétés anciennes

'**Janetzski**', '**Regina II**', '**Zoollerngold**', variétés populations sélectionnées dans des populations étrangères (allemandes ou suédoises).

Variétés récentes

1964, '**Cresus**' (Ringot, France), première variété lignée pure de printemps inscrite au catalogue officiel, résistante à la verse et ayant une teneur en huile élevée.

1975, '**Brutus**' (Ringot, France), variété lignée pure plus productive que 'Crésus'.

1976, '**Crésor**' (Ringot, France), première variété lignée pure de printemps sans acide érucique, issue de la conversion par rétrocroisements de 'Crésus'.

1978, '**Brutor**' (Ringot, France), variété lignée pure sans acide érucique issue de la conversion par rétrocroisements de 'Brutus'.

1976, '**Maris Haplona**' (P.B.I., Royaume-Uni), variété lignée pure issue d'une plante haploïde spontanée dont le stock chromosomique a été doublé à l'aide de la colchicine.

1987, '**Pactol**' (Semences Cargill, France), première variété lignée pure de printemps de type « double zéro » ou « 00 », c'est-à-dire sans acide érucique et à teneur abaissée en glucosinolates (20 μ moles).

1987, '**Drakkar**' (SERASEM, France), première variété lignée pure de printemps de type « double zéro », c'est-à-dire sans acide érucique et à teneur très basse en glucosinolates (6 μ moles).

1994, '**Hybridol**' (Semences Cargill, France), première variété hybride inscrite en France. Elle utilise la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique Polima pour la production des semences.

2000, '**Cadoma**' (Monsanto SAS, France), variété lignée pure ayant une forte teneur en acide oléique (77 %). Elle est, par ailleurs, de type « 00 », c'est-à-dire sans acide érucique et à teneur en glucosinolates inférieure à 10 μ moles.

2000, '**Mistral**' (Serasem, France), première association variétale de colza de printemps : c'est un composite hybride-lignée (*cf.* Types variétaux, p. 269). Elle est de type « 00 ».

2002, '**Calida**' (Monsanto SAS, France), variété lignée pure à très faible teneur en acide α -linolénique (1,2 %).

2002, '**MLCP 63**' (Monsanto SAS, France), variété lignée pure à forte teneur en acide oléique (77 %) et à faible teneur en acide α -linolénique (2,4 %).

Colza oléagineux d'hiver

En France, on cultive du colza d'hiver majoritairement.

Variétés anciennes

'**Nain de Hambourg**' (Mansholt, Allemagne), variété population d'origine allemande se caractérisant par une hauteur de plante courte (1,10-1,25 m) à ramifications basses et une assez bonne résistance à la maladie du pied noir des Crucifères ou nécrose du collet des Crucifères (*Phoma lingam*). Cette variété était assez sensible au froid, ce qui a limité sa culture aux régions maritimes ou méridionales.

'**Lembke**' (Allemagne), variété population allemande caractérisée par une hauteur de plante assez grande (1,60-1,70 m) et une bonne résistance au froid. Les variétés '**Alsace**' et '**Valois**' qui en sont issues par sélection massale, ont des caractéristiques très proches.

Variétés récentes

1962, '**Sarepta**' (INRA, France), première variété lignée pure obtenue par sélection généalogique. Elle présentait une assez bonne résistance au froid et à la nécrose du collet.

1964, '**Oléor**' (INRA, France), variété lignée pure se caractérisant par une teneur en huile légèrement supérieure à celle des autres variétés de l'époque.

1966, '**Titus**' (Ringot, France), variété lignée pure, résistante à la verse mais s'étant avérée très sensible à la nécrose du collet.

1971, '**Major**' (INRA, France), variété lignée pure, avec une bonne résistance à la verse, au froid et à la nécrose du collet.

1973, '**Primor**' (INRA, France), variété lignée pure, qu'il a fallu commercialiser rapidement du fait de sa nouveauté : c'était la première variété française sans acide érucique. Malheureusement, cette variété s'est rapidement avérée être sensible à la nécrose du collet, ce qui a nui grandement à son développement commercial.

1977, '**Jet-Neuf**' (Ringot, France), première variété lignée pure, sans acide érucique et résistante à la nécrose du collet. Cette lignée a connu un développement spectaculaire dans toute l'Europe en occupant environ 60 % de la surface totale en colza oléagineux, y compris en Pologne.

1983, '**Bienvenu**' (Serasem, France), variété lignée pure sans acide érucique et sensible à la nécrose du collet. Cette variété a été beaucoup cultivée jusqu'à la conversion vers les types « double zéro » ou « 00 » (cf. variété 'Samourai').

1984, '**Darmor**' (INRA, France / Ringot, France), première variété lignée pure, de type « double zéro », c'est-à-dire sans acide érucique et à teneur abaissée en

glucosinolates (25 μ moles) et présentant également une bonne résistance à la nécrose du collet.

1985, '**Gaspard**' (Serasem, France), première variété lignée pure sélectionnée pour sa richesse en acide érucique dont le succès a été limité par sa forte teneur en glucosinolates. Cette lignée est à l'origine de 'Jet-Neuf' (conversion de type « simple zéro » de 'Gaspard').

1989, '**Samourai**' (INRA, France / Serasem, France), première variété lignée pure véritablement de type « double zéro », c'est-à-dire sans acide érucique et à teneur faible en glucosinolates (15 μ moles).

1991, '**Eurol**' (Semences Cargill, France) et '**Falcon**' (NPZ-Lembke, Allemagne), variétés lignées pures très productives de type « double zéro ».

1992, '**Goéland**' (Dippe, Allemagne), variété lignée pure issue d'une plante haploïde doublée. Elle est de type « double zéro ».

1993, '**Bristol**' (Semences Cargill, France), variété lignée pure de type « double zéro », très précoce et à tige courte. Elle est très cultivée en raison de sa précocité dans les régions présentant un faible risque de nécrose du collet.

1993, '**Synergy**' (Serasem, France), première association variétale de colza : c'est un composite hybride-lignée (*cf.* Types variétaux, p. 269). Il se distingue par un excellent rendement dans le sud et dans l'ouest de la France et est de type « double zéro ». La production de semences est basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA ».

1995, '**Capitol**' (Semences Cargill, France), variété lignée pure de type « double zéro », semi-tardive et à tige haute, connaissant un grand succès commercial car elle présentait un haut niveau de résistance à la nécrose du collet, grâce à un gène majeur *Rlm1*. Celui-ci a été, contourné, depuis.

1995, '**Navajo**' (Cambridge Plant Breeders, Royaume-Uni), variété de type « double zéro », non inscrite en France, mais ayant occupé une part importante du marché.

1995, '**Pronto**' (NPZ-Lembke, Allemagne), première variété hybride commercialisée en France utilisant le système d'hybridation NPZ.

1998, '**Caddy**' (DSV Lippstadt, Allemagne / Semences Cargill, France), première variété lignée pure de type « double zéro » et à basse teneur en acide α -linoléique (3,1 %).

1998, '**Pollen**' (Momont et Fils, France), variété lignée pure, demi-tardive, ayant un grand succès commercial car elle conjugue rendement, teneur en huile et résistance aux maladies.

1998, '**Zeruca**' (INRA, France / Serasem, France), première variété française lignée pure riche en acide érucique (54 %) et à faible teneur en glucosinolates (15 μ moles). Cette variété a représenté, en 2000, 80 % du marché des variétés riches en acide érucique en France.

1999, **‘Lutin’** (INRA, France / Serasem, France), première variété hybride dont la production de semences est basée sur l’utilisation de la stérilité mâle nucléocytoplasmique « Ogu-INRA » et d’un gène de restauration de fertilité. Elle est de type « double zéro » et est, en outre, demi-naine car elle possède le gène de nanisme *Bzh*.

2000, **‘Extra’** (Monsanto SAS, France), première variété hybride, avec une hauteur de plante « classique » (en effet, elle ne possède pas de gène de nanisme) et de type « double zéro ». La production de semences est basée sur l’utilisation de la stérilité mâle nucléocytoplasmique « Ogu-INRA » et cette variété possède un gène de restauration de fertilité.

2000, **‘Aviso’** (Danisco Seeds, Danemark), variété lignée pure, de type « double zéro », à haut potentiel de rendement, résistante à la nécrose du collet.

2004, **‘Splendor’** (Monsanto SAS, France), variété lignée pure à forte teneur en acide oléique (76,5 %) et à faible teneur en acide α -linoléique (2,7 %).

Colza fourrager de printemps

1960, **‘Liho’** (Limburger Hof, Allemagne), variété précoce. C’est dans cette variété que sont apparus les premiers mutants sans acide érucique au Canada.

1965, **‘Toro’** (Ringot, France), variété présentant une digestibilité améliorée par rapport à celle de ‘Liho’.

1983, **‘Furax Nova’** (Ringot, France), une des premières variétés sans acide érucique.

Colza fourrager d’hiver

Variétés anciennes

‘Parapluie’ (synonymes **‘Rabat’** et **‘Parasol’**), variété population de l’ouest de la France qui a longtemps été la plus cultivée en raison de son fort rendement fourrager. Cette variété dont la hauteur de la plante était importante (1,70-1,80 m), était sensible au froid et à la verse. Ses siliques retombantes à maturité, donc peu sujettes à l’égrenage, sont une caractéristique originale.

‘Rapso’, variété population assez résistante au froid et d’une hauteur de plante moyenne.

Variétés récentes

1983, **‘Kentan Nova’** (Ringot, France), une des premières variétés sans acide érucique, mais à forte teneur en glucosinolates. C’est une variété lignée pure.

1994, **‘Listol’** (DSV Lippstadt, Allemagne / Semences Cargill, France), une des premières variétés de type « double zéro ». C’est une variété lignée pure.

Remarque. La réalisation de toutes ces innovations, comme, par exemple, l’absence d’acide érucique ou la faible teneur en glucosinolates, a nécessité le

recours à des géniteurs particuliers qui se retrouvent dans la généalogie de la plupart des variétés. Le colza de printemps est cultivé dans de nombreux pays tels que le Canada, l'Australie, la Chine, le Japon et l'Europe de l'Ouest alors que le colza d'hiver est principalement cultivé en Europe, très peu au Canada (Ontario) et depuis très récemment, un peu aux États-Unis. Ceci explique que la variabilité soit plus importante dans les variétés de colza de printemps que dans celles de colza d'hiver.

Regard sur 50 ans de sélection

Le colza a été sélectionné, au début du XX^e siècle, pour créer des variétés populations. Puis, en France, à partir des années 1950, le choix a été fait de traiter le colza comme une espèce autogame, ce qui a débouché sur la sélection de variétés de type lignées pures. À partir des années 1980, l'objectif visé a été l'obtention d'hybrides entre lignées améliorées pour tirer parti du fort effet d'hétérosis.

Dans les années 1950, la surface de colza ne dépassait pas 100 000 ha pour un rendement moyen de 14 q/ha.

Au cours des années 1950 et 1960, la sélection du colza a surtout consisté à rechercher une meilleure adaptation aux différentes conditions pédoclimatiques : des progrès ont alors été réalisés notamment dans la résistance au froid et la résistance à la nécrose du collet (*Phoma lingam*).

Le début des années 1970 a été marqué par l'arrivée sur le marché des premières variétés produisant une huile sans acide érucique. À cette période, 300 000 ha étaient cultivés.

Dans les années 1980, les débouchés (le tourteau pour l'alimentation animale) se sont accrus grâce à la création de variétés de type « double zéro ». L'intérêt du colza a été entièrement relancé, si bien qu'en 1987, 730 000 ha étaient cultivés. Dans les années 1990, les premières variétés hybrides sont apparues, apportant une augmentation importante du rendement (38 q/ha en moyenne en 1998). Les surfaces de colza ont atteint 1 110 000 ha en 2004, grâce notamment à la possibilité qui a été offerte aux agriculteurs de cultiver du colza dans les jachères industrielles pour la production du diester.

Des programmes de recherches importants sont menés sur cette espèce en France ainsi qu'au Canada, en Asie (surtout Inde et Chine), en Australie, aux États-Unis, en Allemagne et au Royaume-Uni. Les méthodes et les objectifs de sélection sont cependant très variables d'un pays à l'autre. Le nombre d'entreprises sélectionnant le colza en France est passé de 3 à 15 en 40 ans.

En 2000, 2,8 millions d'hectares de colza transgénique étaient cultivés dans le monde principalement au Canada, tandis que, dans l'Union européenne, sa culture n'était pas autorisée.

Caractères importants améliorés

Qualité de l'huile et du tourteau

Absence d'acide érucique dans l'huile. Il a été montré, chez le rat de laboratoire, que la très forte consommation d'acide érucique engendrait des lésions cardiaques, en plus de l'accumulation anormale de graisse et d'un retard de croissance. Cependant, cet effet néfaste n'a jamais été démontré chez l'homme. Les Asiatiques, par exemple, consomment en grande quantité de l'huile de colza contenant de l'acide érucique. La présence d'acide érucique dans l'huile des variétés de colza antérieures à 1970 est à l'origine de la mauvaise image, parfois encore tenace, de cette huile. L'action de l'INRA et de l'Association des industries des semences de plantes oléoprotéagineuses (AMSOL), pour créer la variété 'Primor' a été essentielle. Toutes les variétés destinées à l'alimentation humaine commercialisées en France sont sans acide érucique depuis 1973. Il est probable que la culture du colza aurait cessé en France si des variétés sans acide érucique n'étaient pas apparues. Dans une variété ancienne, la teneur en acide érucique est d'environ 45 %, alors qu'elle est inférieure à 2 % dans les variétés dites « zéro érucique ».

Faible teneur en glucosinolates du tourteau. Les essais visant à introduire le tourteau de colza dans des rations animales ont montré que les glucosinolates, composés soufrés contenus dans celui-ci, provoquaient, à haute dose, des troubles thyroïdiens occasionnant la formation de goitre chez les animaux monogastriques. Chez les ruminants, la présence de glucosinolates réduit considérablement l'appétence du tourteau. La réalisation de variétés à teneur réduite en glucosinolates a permis de mieux valoriser le colza puisque le tourteau est devenu utilisable pour l'alimentation du porc et de la vache laitière. En 1980, la teneur en glucosinolates était proche de 100 $\mu\text{moles/g}$ de graine. Les variétés actuelles ont une teneur moyenne comprise entre 10 et 15 $\mu\text{moles/g}$ de graine.

Variétés « double zéro » ou « 00 ». La double conversion des variétés en version sans acide érucique et à faible teneur en glucosinolates a été déterminante dans la poursuite de la culture, puis dans son essor en France. La même évolution a eu lieu au Canada, où les nouvelles variétés « double zéro » font l'objet d'une dénomination particulière, « canola », qui concerne les variétés des trois espèces, *B. napus*, *B. rapa* et *B. juncea*.

Acide α -linoléinique. L'huile de colza contient environ 10 % d'acide α -linoléinique. Cet acide gras est le principal responsable de l'odeur rance, désagréable, de l'huile de friture, c'est pourquoi il peut être intéressant de faire baisser le taux d'acide α -linoléinique. Des variétés à teneur réduite (environ 3 % au lieu de 10 %) en cet acide gras essentiel ont été obtenues ('Caddy').

Huiles à usages particuliers

Forte teneur en acide érucique ou en acide laurique. La richesse de l'huile en acide érucique peut être valorisée par l'industrie dans la fabrication des

détergents : des variétés très riches en acide érucique (teneur supérieure à 50 %) ont ainsi été créées spécifiquement pour les besoins de l'industrie. Par ailleurs, au Canada et aux États-Unis, sont autorisées à la commercialisation des variétés de colza transgénique (événements de transformation 23-198 et 23-18-17) produisant une huile riche en acide laurique (jusqu'à 40 %), teneur que l'on retrouve dans l'huile de noix de coco et dans celle de palme. Le taux d'acide myristique est aussi augmenté dans ces variétés aux dépens de celui des acides oléique et linoléique.

Forte teneur en acide oléique. L'effet hypocholestérolémiant de l'huile de colza sur les humains est probablement le fait d'une haute teneur en acide oléique (environ 61 % des acides gras) et d'une faible teneur en acides gras saturés totaux (environ 7 %). Des variétés de colza avec une huile ayant déjà plus de 75 % d'acide oléique ont déjà été inscrites.

Résistance aux maladies

La nécrose du collet des Crucifères. L'amélioration du colza pour la résistance à cette maladie, causée par le champignon *Phoma lingam* (dont la forme sexuée est *Leptosphaeria maculans*) a toujours été une préoccupation majeure des sélectionneurs : les variétés 'Jet-Neuf' et 'Darmor' présentent une résistance polygénique partielle au stade adulte. Au début des années 1990, des variétés présentant un niveau très élevé de résistance au champ à *L. maculans* ont été commercialisées. Il s'est avéré que leur résistance était due à un gène majeur *Rlm1* (résistance spécifique) qui a été rapidement contourné en raison de son utilisation dans des variétés beaucoup cultivées et de la pression de sélection que ce gène exerçait sur les populations du champignon. Les programmes se sont orientés vers une exploitation à la fois de la résistance monogénique et de la résistance polygénique pour tenter d'améliorer la durabilité des résistances. Depuis les années 2000, la plupart des variétés disponibles sur le marché sont résistantes.

La cylindrosporiose (*Cylindrosporium concentricum*) et la pseudocercosporiose ou maladie des taches blanches (*Pseudocercospora capsellae*). Des variétés résistantes à ces deux maladies fongiques ont aussi été sélectionnées.

Rendement

En un peu plus de 50 ans, le rendement est passé, en France, de 14 q/ha à 38 q/ha avec les variétés de type lignée pure. Cette progression n'a pas été continue. L'introduction des caractères « absence d'acide érucique », puis « faible teneur en glucosinolates » s'est traduite par des pauses dans la progression du rendement des lignées, constante aujourd'hui. Ainsi, entre 1988 et 2000, l'augmentation moyenne du rendement a été d'1,4 % par an.

L'exploitation de l'hétéroosis, importante chez cette espèce, constitue une autre approche pour augmenter le rendement. Ceci s'est concrétisé par la mise au point d'associations variétales. L'association variétale, dont la production de

Stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA » et restauration de la fertilité

Plusieurs systèmes d'hybridation sont utilisés pour la production de semences hybrides de colza dans le monde. Parmi ces différents systèmes, la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique, décrite par H. Ogura dans la variété-population japonaise 'Kubora-riso' de radis (*Raphanus sativus*) en 1968, a été transférée par croisements interspécifiques dans le chou, puis dans le colza par l'INRA. Les plantes obtenues étaient mâles stériles, mais présentaient une déficience chlorophyllienne qui les rendait inutilisables. Des fusions de protoplastes (procédé breveté) ont permis de corriger cette déficience chez le colza, en donnant des plantes « cybrides » mâles stériles ayant une bonne activité chlorophyllienne. Ces plantes associent dans un même cytoplasme hybride, des génomes chloroplastique et nucléaire de colza à un génome mitochondrial recombiné radis-colza (brevet Ogu-INRA).

Par ailleurs, des lignées restauratrices de fertilité ont été obtenues par croisement avec un *Napo-Raphanus* (hybride colza-radis). Les chromosomes de radis n'échangeant que très rarement des gènes avec les chromosomes de colza, ces lignées portaient trop de caractères défavorables (teneur élevée en glucosinolates, anomalies de méiose et faible fertilité femelle). La poursuite des programmes d'amélioration a abouti à des lignées restauratrices de fertilité de bonne qualité. En attendant l'amélioration des lignées restauratrices, des types variétaux intermédiaires ont été proposés : l'association variétale ou la variété hybride mixte (cf. Types variétaux, p. 269). Des hybrides restaurés sont cultivés à grande échelle au Canada.

Le système Ogu-INRA est exploité par l'ensemble des sélectionneurs (licence d'exploitation de brevet et de savoir-faire). Le gène de restauration *Rfk* vient d'être isolé par clonage positionnel chez le radis 'Kosena' par une équipe japonaise et, indépendamment, le gène *Rfo* (stérilité Ogura) par une équipe française et une équipe canadienne. Ces gènes codent une protéine présentant un motif de répétition pentatricopeptidique (PPR).

semences repose sur l'utilisation d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique (cf. encadré ci-dessus) ou d'une stérilité mâle nucléaire induite par transgénèse, est, en effet, le type variétal potentiellement le plus productif. En 2000, le rendement moyen des associations variétales était de 46 q/ha et celles-ci représentaient environ 10 % du marché des semences certifiées en France.

Qualités agronomique et environnementale

La création de variétés demi-naines (environ 1,20 m de hauteur au lieu de 1,80 m) possédant le gène de nanisme *Bz1h*, a permis d'augmenter la résistance à la verse et de faciliter les interventions de l'agriculteur au cours de la culture. En outre, ces variétés présentent une meilleure résistance au froid. Les variétés demi-naines de colza sont aussi intéressantes du fait qu'elles ne présentent pas d'élongation en automne. Il est ainsi possible de semer de telles variétés très précocement, juste après la récolte de la céréale qui les précède, ce qui permet de mieux piéger les nitrates du sol. Ces variétés ont encore une productivité trop faible pour connaître un fort développement.

Difficultés et obstacles

Certaines variétés de type « double zéro » de colza sont très appétentes pour le gibier. Dans les années 1980, en Autriche notamment, des champs de variétés de type « double zéro » ont été dévastés par du gibier, du fait de leur appétence. Des lièvres et des chevreuils sont morts par météorisation suite à une surconsommation de colza. Ce fait a été observé deux années de suite, mais n'a plus, depuis, représenté une préoccupation majeure.

Les associations variétales n'ont pas l'aire de culture escomptée et sont confinées aux régions à printemps doux, ceci malgré un potentiel de rendement jamais égalé. 'Synergy' est une association variétale de type composite hybride-lignée (car composée d'un hybride mâle stérile et d'une lignée pollinisatrice), qui a manifesté de sérieux accidents de nouaison l'année de sa diffusion dans le centre et l'est de la France. Les fleurs des plantes mâles stériles ont avorté, dans des conditions de faible ensoleillement, ce qui a entraîné une diminution drastique du nombre de graines. La culture des associations variétales est maintenant limitée au sud et à l'ouest de la France.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI Une plante donnant une huile sans acide érucique, est apparue au Canada dans la variété 'Liho'. Le caractère « zéro érucique » est contrôlé par deux gènes à effet additif. Il a donc fallu que se produisent une mutation sur le génome du chou et une autre sur le génome de la navette pour que le caractère « absence d'acide érucique » apparaisse.
Mutagenèse induite	OUI par mutagenèse au MSE. Les principaux caractères obtenus sont : – une faible teneur en acide α-linolénique ('Caddy') ; – une haute teneur en acide oléique (> 78 %) ('Cadoma'). Ces mutants ressemblent fortement au mutant <i>fad 2</i> d'<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh. Le gène <i>fad 2</i> code une désaturase qui ajoute – une insaturation aux acides gras à 18 carbones mono-insaturés. Son inactivation par mutation conduit à une accumulation d'acides gras à 18 carbones mono-insaturés tels que l'acide oléique ; – le nanisme. Le gène dit <i>Bzh</i>, responsable de ce caractère, correspond au gène <i>Gai</i> (<i>Gibberellic acid insensitive</i>, insensibilité à l'acide gibbérellique) identifié chez <i>Arabidopsis thaliana</i> ('Lutin') ; - une résistance aux imidazolinones. Jusqu'à présent, les variétés obtenues ne sont cultivées qu'au Canada ('45A71', '292CL') ; – la cléistogamie. Ce caractère permet de diminuer la dispersion du pollen de colza.
Croisements interspécifiques	OUI La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique Ogura venant d'un radis japonais (<i>Raphanus sativus</i>) a été introduite dans le chou, puis dans le colza respectivement par croisement intergénérique et par croisement interspécifique.

suite...

... suite

L'introduction du gène *Rfo* de restauration de la fertilité mâle dans le système « Ogu-INRA » résulte de croisements intergénériques avec un *Napo-Raphanus*.

Un gène de résistance au *Phoma lingam* a été introduit à partir de la moutarde brune (*B. juncea*). La variété contenant ce gène est très résistante, mais des études de durabilité ont montré que ce gène peut être contourné.

Le caractère 'graines jaunes' a été partiellement introduit, par différentes équipes, de *B. rapa* ou de *B. carinata* A. Braun dans le colza.

ESSAIS

Introduction de la résistance au *Phoma lingam* à partir de la moutarde noire (*B. nigra* (L.) W. D. J. Koch) et de la moutarde brune (*B. juncea*). Il n'y a pas encore de variétés disponibles.

Hybridation somatique

OUI

L'hybridation des cytoplasmes par fusion de protoplastes a permis d'obtenir un cytoplasme porteur d'une stérilité mâle et ayant une bonne activité chlorophyllienne ('Synergy', 'Lutin', 'Royal'...). La même approche a été appliquée pour induire plusieurs stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques à partir de différentes espèces.

ESSAIS

Transfert au colza, d'une résistance aux triazines (herbicides). Cette résistance a été découverte chez une navette ayant réussi à croître dans un champ de maïs traité avec ces herbicides. Mais, cette résistance est due à une mutation dans le génome chloroplastique qui provoque une baisse de rendement photosynthétique se traduisant, au niveau de la plante, par une baisse de productivité importante. Néanmoins, de telles variétés sont cultivées en Australie

Élévation du niveau de ploïdie

AUCUNE

Le colza est une espèce naturellement amphidiploïde.

Transgénèse

OUI

1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur le colza en 1987.

Essais au champ de colza transgénique. Le colza a fait l'objet de nombreux essais au champ. Rien qu'aux États-Unis, presque 150 essais au champ avaient été réalisés en 2000. Actuellement, le nombre d'essais semble baisser aux États-Unis et il y en a eu moins de 5 en France en 2002.

Variétés transgéniques existantes (cf. encadré p. 270 à 272). Des variétés résistantes à différents herbicides (glufosinate d'ammonium, oxynil et glyphosate) ont été créées et ont passé avec succès les tests permettant leur commercialisation dans de nombreux pays. Par ailleurs, les variétés hybrides cultivées actuellement au Canada sont transgéniques et possèdent un système facilitant la production d'hybrides restaurés associé à une résistance à un herbicide (Seedlink®). Bayer CropScience commercialise de nombreuses variétés basées sur plusieurs événements de transformation différents : PGS1 – 1995 ; PGS2 – 1995 ; MS8 × RF3 – 1997 ; PHY14, PHY35 et PHY36 – 1997. Enfin, des variétés produisant une huile à haute teneur en acide laurique ont été développées par Calgene.

suite...

... suite

Espèce modèle pour l'étude des flux de gènes. La dissémination de transgènes dans l'environnement fait l'objet de très nombreuses études (cf. encadré p. 270).

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplification végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	OUI L'haploïdisation peut se produire spontanément et est à l'origine de certaines variétés ('Maris Haplona') ou être induite par culture d'anthers ou de microspores isolées <i>in vitro</i> (nombreuses variétés). L'haplométhode est utilisée depuis longtemps pour l'amélioration du colza : les plantes haploïdes doublées peuvent être directement diffusées sous forme de variétés lignées pures ('Goéland') ou servir de géniteurs pour la réalisation de variétés hybrides. Cette méthode a fait ses preuves chez le colza car des variétés peuvent être produites en 4 à 5 ans par haplométhode, alors qu'il faut 8 à 9 ans par sélection généalogique. Les lignées haploïdes doublées sont aussi intensivement utilisées pour des études génétiques et pour aider à la construction de cartes génétiques.
Recours à la stérilité mâle	OUI La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Ogu-INRA » (cf. encadré p. 265) a été obtenue par croisements interspécifiques et corrigée par hybridation somatique ('Synergy'). La restauration de la fertilité était liée, jusqu'à récemment, à des caractères délétères. La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique Polima, découverte dans une population chinoise de colza a permis de réaliser les premières variétés hybrides ('Hybridol'). Cette stérilité mâle présente l'avantage de pouvoir être restaurée facilement, mais a le défaut de n'être maintenue que par très peu de lignées « mainteneuses » de stérilité et de présenter une instabilité de la stérilité face à des fluctuations de température. Cette stérilité mâle n'est presque plus travaillée en Europe. Il n'existe pas de variété de colza d'hiver de ce type car aucune bonne lignée mainteneuse de stérilité n'a pu être trouvée. La stérilité mâle NPZ ('Pronto'). La stérilité mâle nucléaire Seedlink® a été obtenue par transgénèse. Ce système est utilisé dans la plupart des variétés hybrides cultivées au Canada. En Chine, certains hybrides sont produits à l'aide d'une stérilité mâle nucléaire digénique.
Recours à l'auto-incompatibilité	ESSAIS L'université de Cambridge (Royaume-Uni), l'université de Guelph (Canada) ainsi que quelques sociétés semencières en France ont essayé d'introduire l'auto-incompatibilité chez le colza de manière à produire des variétés hybrides. Ce système est aujourd'hui abandonné.
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs moléculaires sont utilisés : – pour identifier le matériel ; – pour constituer des groupes d'aptitude à la combinaison ;

suite...

... suite

- pour établir des cartes génétiques. L'utilisation de lignées recombinantes fixées par haplodiploïisation a permis de faciliter le travail ;
- pour réaliser une sélection assistée par marqueurs. Il existe des marqueurs des gènes de restauration de fertilité (système « Ogu-INRA » ou Polima), de nanisme (*Bzh*), du caractère graine jaune, des teneurs en acides érucique, oléique et α -linoléique, des glucosinolates, et de résistance aux maladies (nécrose du collet, cylindrosporiose...) ;
- pour tirer profit de la synténie qui existe avec l'espèce *Arabidopsis thaliana*. Cette dernière sert de modèle, notamment dans le clonage de gènes d'intérêt ou le développement de marqueurs moléculaires pour le colza.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale ('Parapluie',...) Sélection généalogique ('Eurol', 'Zeruca',...) Haplométhode ('Goéland') Rétrocroisements pour des caractères à déterminisme simple tels que la teneur en acide érucique ou en acide α-linoléique, la teneur en glucosinolates, la stérilité mâle (restauration [<i>Rfo</i>]) et le nanisme.
Types variétaux	Variété population. C'était le cas des variétés anciennes ('Nain de Hambourg',...). Variété lignée pure. Ces variétés peuvent être issues de sélection généalogique ou d'haplodiploïisation. Elles représentaient 78 % du marché en 2001. Variétés hybrides ou exploitant l'hybridité. Association variétale. Une association variétale qualifie un mélange associant un hybride mâle stérile avec un, deux ou plusieurs composants pollinisateurs. Lorsque le (ou les) pollinisateur(s) est (ou sont) une (ou des) lignée(s) pure(s), l'association est alors de type composite hybride-lignée(s). Lorsque le (ou les) pollinisateur(s) est (ou sont) un (ou des) hybride(s), l'association est alors de type composite hybride-hybride(s). Variété hybride. Les variétés hybrides ('Extra', 'Royal', 'Lutin'...), qui sont apparues plus récemment, peuvent être, soit des hybrides restaurés, soit des hybrides mixtes : – un hybride restauré, lorsqu'il est simple, provient du croisement entre une lignée mâle stérile et une lignée restauratrice de fertilité. Les hybrides en résultant sont 100 % fertiles. Il existe aussi des variétés hybrides « 3 voies » restaurées, provenant du croisement entre un hybride simple mâle stérile et une lignée restauratrice de fertilité. Les hybrides en résultant sont 100 % fertiles ; – un hybride mixte est issu du croisement entre une lignée mâle stérile et un hybride restauré. Les variétés de ce type possèdent 50 % de plantes stériles et 50 % de plantes fertiles. Les hybrides mixtes ne sont pratiquement pas cultivés, mais ils avaient été envisagés comme solution pour pallier les problèmes de nouaison rencontrés dans les associations variétales et de teneur trop élevée en glucosinolates des premières lignées restauratrices « Ogu-INRA ».

Saisine ministérielle : les flux de gènes chez le colza

À l'initiative de la Communauté européenne (1988-1992), de nombreux travaux ont été menés pour estimer les fréquences de fécondation croisée avec les populations de Brassicacées sauvages présentes dans ou à proximité des champs de colza. Par exemple, la Commission du génie biomoléculaire (CGB) a étudié, dans le cadre d'une saisine ministérielle, la dissémination possible de transgènes de résistance à un herbicide, dans le cas du colza.

Flux de gènes au sein de *B. napus*. Les flux de gènes, au sein de l'espèce colza, ont depuis longtemps été pris en compte par les agriculteurs multiplicateurs de semences. Les distances minimales recommandées pour la multiplication sont de 1 000 m pour les semences de l'obteneur, 400 m pour les semences de base et 200 m pour les semences de variété commerciale. Par ailleurs, après toute récolte, entre 1 000 et 6 000 graines/m² subsistent sur le sol où elles peuvent rester en dormance pendant 5 ans et même parfois 10 ans, si elles sont enfouies par le labour. Dans le cas d'un colza transgénique, la dissémination de transgènes peut donc d'abord se faire par la semence. Les transgènes peuvent aussi être transmis par le pollen. En conditions naturelles, il a été montré qu'une plante de colza située à 0 m, 30 m ou 90 m d'une plante de colza transgénique, produisait respectivement 30 %, 1 % ou 0,1 % de semences transgéniques. Des études sont menées sur des plantes cléistogames (c'est-à-dire dont la fleur ne s'épanouit pas) pour limiter les possibilités de pollinisations croisées.

Flux de gènes entre *B. napus* et d'autres Brassicacées. Les plantes de colza peuvent polliniser avec succès la navette (*B. rapa*). Cependant, de tels événements se produisent très rarement en France avec la navette, car cette espèce n'est présente que très occasionnellement dans les aires de cultures du colza. Aucun essai n'a été conduit avec l'autre progéniteur, le chou (*B. oleracea*), dont les formes sauvages ne sont pas présentes dans les zones de culture du colza. L'étude de la probabilité de fécondation de différentes adventices par le colza a montré que celle-ci était faible pour la ravenelle, *Raphanus raphanistrum* L. (comprise entre 1 hybride parmi 33 000 à 10 millions de graines produites par la ravenelle poussant dans un champ de colza, très faible pour la roquette bâtarde, *Hirschfeldia incana* (L.) Lagr.-Foss. et négligeable pour la moutarde des champs, *Sinapis arvensis* L. Par ailleurs, les structures génomiques des hybrides ravenelle x colza ont été plus particulièrement étudiées. Au cours de la méiose, les chromosomes de colza semblent capables de se recombiner avec ceux de la ravenelle ; cependant, aucune introduction stable du transgène n'a été observée à ce jour dans le génome de la ravenelle. L'étude de l'impact des différentes structures génomiques observées et de la localisation initiale du transgène est poursuivie.

Conclusions de cette étude. La résistance à un herbicide n'apportant pas d'avantage sélectif particulier en dehors de son application, la culture de variétés de colza transgénique tolérantes à un herbicide n'engendre pas de risques importants de propagation de transgènes dans les écosystèmes naturels. En ce qui concerne les risques agronomiques, si la gestion d'adventices ayant intégré un gène de résistance à un herbicide ne semble pas techniquement insoluble, « les repousses d'un colza tolérant à un herbicide posent des problèmes directs et indirects ».

Ces travaux sont complétés par ceux réalisés dans le cadre de l'étude Inter-instituts.

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation dans au moins un pays

Résistance aux herbicides à phosphinothricine. La phosphinothricine est le composé actif des herbicides à glufosinate d'ammonium. Cette substance, produite par la bactérie du sol *Streptomyces viridochromogenes*, provoque une diminution de la production de glutamine et une accumulation d'ammoniaque dans les tissus qui conduisent à la mort des plantes traitées.

L'expression du gène *pat*, provenant lui aussi de *Streptomyces viridochromogenes*, permet de conférer une résistance aux herbicides à glufosinate d'ammonium. En effet, la protéine codée par ce gène, la PAT (phosphinothricine-N-acétyltransférase), détoxifie la phosphinothricine (composé actif des herbicides) en catalysant son acétylation. Le fait que la bactérie *S. viridochromogenes* soit présente partout dans le sol et qu'aucun effet délétère n'ait été déclaré sur l'Homme, les animaux ou les plantes tend à montrer l'innocuité de la PAT. La PAT ne présente aucune homologie avec des protéines connues pour leur caractère allergène ou toxique. Les lignées et les variétés transgéniques ne présentent pas une teneur plus importante en acide érucique et en glucosinolates. Par ailleurs, l'huile extraite du colza ne contient de toute façon aucune trace de protéine.

Résistance au glyphosate. Deux gènes doivent être introduits pour obtenir une résistance satisfaisante à un autre herbicide, le glyphosate :

- l'EPSPS (5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthétase) est une enzyme, présente exclusivement chez les plantes et les bactéries, qui est responsable de la biosynthèse des acides aminés aromatiques tels que la tyrosine, la phénylalanine et le tryptophane. Le glyphosate, l'agent actif de l'herbicide Roundup®, agit en se fixant et en inactivant l'EPSPS. Un gène, découvert chez la souche CP4 d'*Agrobacterium tumefaciens*, code une EPSPS insensible au glyphosate (CP4 EPSPS). L'affinité du glyphosate pour la CP4 EPSPS est très faible, ce qui permet aux plantes produisant cette enzyme de résister à l'herbicide. Des animaux élevés avec une nourriture contenant un supplément de cette protéine n'ont pas eu de problèmes particuliers ;

- un gène *gox* codant une glyphosate oxydase et provenant de la bactérie *Ochrobactrum anthropi* est aussi introduit dans les plantes. Cette enzyme accélère la dégradation du glyphosate en acide aminométhylphosphonique (composé facilement dégradé par de nombreux micro-organismes) et en glyoxylate (composé naturellement présent dans les cellules végétales). Des tests en laboratoire ont montré que l'ingestion de cette protéine n'occasionnait pas de troubles aux animaux.

Contrôle de la fécondation croisée en vue de la réalisation de variétés hybrides. Ce système nécessite la construction de deux lignées distinctes : une lignée mâle stérile (MS) et une lignée restauratrice de fertilité (RF). Le croisement de la lignée MS par la lignée RF produit un hybride totalement fertile. La lignée MS contient le gène *barnase*, isolé chez *Bacillus amyloliquefaciens* (une bactérie commune du sol), sous le contrôle d'un promoteur dirigeant l'expression spécifiquement dans les cellules du sac pollinique durant le développement de l'anthère. Le gène *barnase* code une RNase qui, en s'attaquant aux ARN, perturbe le fonctionnement des cellules et provoque un arrêt précoce du développement des cellules-mères de pollen. Une stérilité mâle est donc obtenue en réalisant l'ablation génétique de cellules nourricières du pollen. La lignée RF contient le gène *barstar*, isolé lui-aussi de *Bacillus amyloliquefaciens*, sous le contrôle du même promoteur spécifique du tapis du sac pollinique. Le gène *barstar* code une protéine qui se fixe spécifiquement et de manière très stable sur la barnase, inhibant l'activité de cette dernière. Une plante hybride qui exprime à la fois le gène *barnase* et le gène *barstar* dans les cellules du tapis du sac pollinique est donc fertile. Les lignées MS et RF sont aussi résistantes aux herbicides de type glufosinate d'ammonium (cf. ci-dessus). La barnase, la barstar et la PAT ne présentent aucune homologie avec des protéines connues pour leur caractère allergène ou toxique. Les lignées et les variétés transgéniques ne présentent pas de taux plus importants d'acide érucique et de glucosinolates.

Haute teneur en acide laurique. Un gène (*Bay TE*) codant une thioestérase (TE) a été isolé chez un arbuste de la famille du laurier (*Umbellularia californica*). Lorsque le gène *Bay TE*, sous le contrôle d'un promoteur spécifique de la graine, est introduit dans le colza, celui-ci acquiert alors la capacité d'accumuler des triacylglycérols contenant de l'acide laurique

estérifié et dans une moindre mesure, de l'acide myristique. La TE ne présente aucune homologie avec des protéines connues pour leur caractère allergène ou toxique. Les lignées et les variétés transgéniques ne présentent pas des teneurs plus importantes en acide érucique et en glucosinolates. Ce programme est maintenant arrêté du fait de l'absence de compétitivité de cette huile avec l'huile de palme.

Perspectives d'amélioration

Le colza est une plante présentant de nombreux intérêts notamment pour le développement d'une agriculture durable. C'est d'abord une véritable pompe à nitrates qui peut efficacement absorber les nitrates qui restent dans le sol après une culture de céréale évitant ainsi qu'ils ne soient lessivés et entraînés dans les nappes phréatiques. L'huile de colza peut être transformée en biocarburant dont l'utilisation a un impact positif sur la réduction de la pollution urbaine.

L'hétérosis n'a pas encore été véritablement exploitée chez le colza, ce qui ouvre des perspectives importantes d'amélioration.

Enfin, le tourteau de colza, très bien adapté à l'alimentation animale, peut contribuer à diminuer le déficit en protéines végétales.

L'amélioration du colza d'hiver est plus complexe et plus longue que celle du colza de printemps, si bien qu'un certain nombre des objectifs déjà atteints chez le colza de printemps sont encore au stade de projet ou de début de réalisation chez le colza d'hiver.

Le colza bénéficie directement de l'apport de travaux s'appuyant sur des techniques de biologie moléculaire effectués sur l'espèce modèle *Arabidopsis thaliana* en raison de l'importante syntenie qui existe entre les génomes de ces deux espèces.

Caractères à améliorer

Rendement

C'est un caractère qu'il faut encore améliorer. Les associations variétales et plus encore les variétés hybrides restaurées sont des structures variétales très récemment apparues. Il est encore nécessaire d'étudier leur comportement pour ajuster au mieux la conduite culturale afin de tirer le meilleur profit non seulement de leur vigueur hybride mais aussi de leurs caractéristiques originales de vigueur en début de végétation, de rusticité et d'adaptation à différents milieux. L'utilisation du gène de nanisme nécessite un travail de sélection pour produire des variétés demi-naines adaptées à ce caractère.

Il est probable que les variétés hybrides restaurées vont se développer dans les prochaines années.

Une meilleure valorisation de l'azote (assimilation, remobilisation...) est à rechercher parallèlement à l'amélioration de la productivité du colza.

Résistance aux maladies et aux insectes

Ces critères sont importants car durant ces dernières années le rendement a diminué du fait de la pression parasitaire imposée par *Sclerotinia sclerotiorum*, *Phoma lingam*, *Cylindrosporium concentricum*, *Plasmodiophora brassicae* (responsable de la hernie des Crucifères).... Le problème du *Phoma lingam* a connu une résurgence, notamment parce que certains géniteurs originaux ou porteurs de caractéristiques nouvelles étaient plus sensibles que les variétés déjà disponibles et du fait de l'évolution des techniques culturales et du contournement du gène *Rlm1*. Des résistances durables de type polygénique sont maintenant systématiquement introduites et le cumul des deux types de résistance (spécifique de type monogénique et quantitative de type polygénique) est également recherché. Par ailleurs, des programmes importants ont pour objectif de tenter de définir des systèmes de gestion plus durables (dans le temps et dans l'espace) des variétés résistantes.

Des travaux fondamentaux sur les inhibiteurs de protéases ont été engagés pour déboucher sur la création de variétés résistantes aux insectes.

Qualité de l'huile

Composition différente en acides gras. Un des objectifs est de diminuer la teneur en acide α -linoléique pour l'abaisser à moins de 3,5 % afin de résoudre les problèmes d'odeur de friture. Un autre est d'augmenter la teneur en acide oléique de 60 à plus 75 %. Il y a, en effet, encore très peu de variétés de ce type et il s'agit aussi *in fine* de coupler ces deux objectifs dans un colza d'hiver. Des huiles de colza « haut oléique et faible α -linoléique » devraient connaître un fort développement pour des usages alimentaires et non alimentaires.

Basse teneur en acides gras saturés pour concurrencer l'huile de soja. Mais, ce travail est plus long et plus complexe dans le cas d'un colza d'hiver que dans celui d'un colza de printemps. En effet, la teneur est plus élevée chez un colza d'hiver que chez un colza de printemps et il est possible de faire deux générations de colza d'hiver par an, tandis qu'on peut en faire quatre avec un colza de printemps. Simultanément, la sélection d'un soja à faible teneur en acides gras saturés progresse.

Huile à usages particuliers. La création de nouvelles variétés à composition en huile différenciée est en cours, notamment par transgénèse : huile à forte teneur en α -tocophérols ou vitamine E, anti-oxydants favorables à la santé humaine ou bien huile à très haute teneur en acide érucique pour l'industrie des détergents.

Teneur en huile

La teneur en huile est de l'ordre de 45 % du poids de matière sèche de la graine. C'est un critère de sélection dont l'importance varie d'un pays à l'autre en fonction du mode de rémunération des agriculteurs. L'objectif est de gagner environ 3 % quelles que soient les conditions culturales et environnementales.

Qualité nutritionnelle et teneur en protéines du tourteau

Teneur réduite en sinapine. La concentration de sinapine est de l'ordre de 1 %. Dans le cas de la poule pondeuse, cet ester de choline et d'acide sinapique est indésirable si celle-ci consomme du tourteau, elle pond des œufs dont la coquille dégage une odeur désagréable.

Présence d'acide phytique. Cette substance, qui possède l'inconvénient de chélater le zinc (c'est-à-dire de bloquer la fixation de cet oligo-élément) et donc d'induire une carence en celui-ci, est présente avec une teneur de 1,5 %. Pratiquement, la présence de cette substance n'est pas néfaste à la santé animale car du zinc est très souvent ajouté aux aliments.

Composition en acides aminés. Il serait très utile de faire un tourteau à haute teneur en acides aminés essentiels (lysine, tryptophane et méthionine). Pour cela des travaux sont engagés afin d'étudier la composition en protéines de réserve dans la graine de colza. En effet, les protéines de réserve sont majoritaires dans la graine (75 % des protéines totales), elles appartiennent à deux familles : les napines (albumines de type 2S) et les cruciférines (globulines de type 12S). Des travaux ont montré que les napines étaient plus riches en acides aminés essentiels notamment soufrés (méthionine et cystéine) que les cruciférines. L'enrichissement de la fraction protéique en napines pourrait donc conduire à améliorer la composition en acides aminés de la graine.

Augmentation de la teneur en protéines. Il y a 35 % de protéines dans le tourteau. On envisage de créer des variétés de colza riches en protéines dans le but d'obtenir un tourteau de meilleure qualité. Le tourteau issu de ces variétés pourrait permettre d'augmenter la part du marché du tourteau de colza par rapport à celle du tourteau de soja. Les industriels sont favorables à un tourteau de colza enrichi en protéines.

Abaissement de la teneur en tannins

Des espèces telles que *B. rapa*, *B. juncea* et *B. carinata* ont une graine jaune qui se caractérise par une teneur plus faible en fibres. Ce caractère apporte une augmentation des rendements en huile et en protéines ainsi que de la digestibilité du tourteau. Il serait donc intéressant de transférer ce caractère par croisements interspécifiques dans le colza. Ce caractère est travaillé depuis de nombreuses années et semble particulièrement difficile à introduire.

Meilleure résistance à l'égrenage (déhiscence de la silique)

Des travaux ont été conduits dans ce domaine. Les gènes impliqués dans ce phénomène sont pour certains d'entre eux connus chez *Arabidopsis thaliana*. Le but est de diminuer les pertes à la récolte, qui peuvent atteindre 10 % certaines années et de réduire aussi par là-même les « repousses » qui sont nombreuses et dont la gestion pose souvent des problèmes.

Techniques à développer

Le développement de banques génomiques et de populations de lignées recombinantes est nécessaire pour le clonage de gènes d'intérêt.

La nécessité d'augmenter la variabilité est telle que toute technique permettant d'y parvenir doit être considérée avec intérêt. Parmi elles, la mutagenèse et la transgénèse sont à retenir.

La sélection assistée par marqueurs, en pleine extension, est une méthode d'avenir pour le colza.

Inscription et protection des variétés en France

1960, ouverture du catalogue officiel des espèces et des variétés.

1968, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste spéciale de plantes oléagineuses multipliées en France en vue de leur exportation.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique particulière des variétés de colza sans acide érucique.

1985, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique destinée à l'inscription des variétés de colza oléagineux avec acide érucique, destinées à un usage non alimentaire.

1994, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique destinée à l'inscription des composites hybride-lignée(s).

1995, ouverture, par arrêté ministériel, d'une annexe destinée à l'enregistrement des associations variétales.

1996, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique correspondant à des variétés utilisées uniquement en tant que pollinisateurs dans les associations variétales.

1998, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique colza oléagineux à faible teneur en acide α -linolénique.

2000, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique colza oléagineux à forte teneur en acide oléique.

2004, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique colza oléagineux à forte teneur en acide oléique et à faible teneur en acide α -linolénique.

En 2003, 102 variétés de colza (4 variétés de colza fourrager et 96 variétés de colza oléagineux dont 17 associations variétales) étaient inscrites au catalogue officiel français et plus de 600 variétés au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, une vingtaine de caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. À l'issue de ces 2 ans, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de

référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par les 3 variétés les plus cultivées. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le CTPS a contribué à orienter la sélection du colza en adaptant les protocoles expérimentaux, en faisant varier les critères d'inscription, en établissant des systèmes de bonification / réfaction, en appliquant des seuils éliminatoires, en créant de nouvelles rubriques et en aménageant le seuil d'inscription pour les variétés présentant des caractères nouveaux.

Adaptation des protocoles expérimentaux

Exemple des variétés composites hybride-lignée(s). Pour juger de la qualité de la pollinisation chez les variétés composites hybride-lignée(s), il a fallu modifier le protocole expérimental de manière à ce que les parcelles d'essais soient isolées de toute source de pollen étranger.

Augmentation du nombre de critères pris en compte pour l'inscription

Évaluation de la résistance au *Phoma lingam* dans des essais spécifiques.

Analyse systématique de la teneur en acide érucique et en glucosinolates des variétés.

Analyse de la teneur en acides gras particuliers (a. α -linoléique, a. oléique) pour les variétés candidates ayant une caractéristique particulière.

Application d'un système de bonification / réfaction

Exemple du colza d'hiver. La cotation d'une variété d'hiver dépend non seulement de son rendement mais aussi de certains critères tels que la teneur en protéines, la teneur en huile, la teneur en glucosinolates et la résistance au *Phoma lingam*. À ces critères, sont attachées des bonifications et des réfactions.

Application de seuils éliminatoires

Si le taux de glucosinolates dépasse 18 μ moles ou en cas de trop grande sensibilité au *Phoma lingam*, l'inscription au catalogue officiel français de la variété de colza d'hiver est refusée.

Ouverture de nouvelles rubriques ou d'annexes au catalogue officiel français

Rubrique : variétés sans acide érucique.

Rubrique : variétés sans acide érucique et à teneur réduite en glucosinolates.

Annexe : pour les associations variétales.

Rubrique : composants d'associations variétales.

Rubrique : variétés à forte teneur en acide oléique.

Rubrique : variétés à faible teneur en acide α -linoléique.

Rubrique : variétés à faible teneur en acide α -linoléique et à forte teneur en acide oléique.

Aménagement du seuil d'inscription pour les variétés présentant un caractère nouveau. L'inscription d'une variété inaugurant un nouveau type a souvent nécessité un aménagement du seuil d'inscription, tenant compte de l'innovation apportée. Les premières variétés inscrites servent ensuite de témoins pour juger les nouveautés, ce qui permet une progression constante des performances.

Exemple des variétés hybrides restaurées. Pour favoriser le développement des hybrides restaurés, une tolérance pour un taux de glucosinolates, un peu plus élevé que la norme appliquée aux variétés classiques de type lignée pure, a été instaurée. Cette mesure transitoire (20 μ moles au lieu de 18) a maintenant été abrogée.

Qualité de l'huile. Les premières variétés sans acide érucique et/ou à taux réduit en glucosinolates ou encore modifiées pour leur composition en acide gras, bien que présentant un rendement inférieur à celui des témoins, ont été inscrites au catalogue officiel afin de faire progresser la qualité de l'huile.

Le CTPS contribue aussi à faire évoluer la réglementation européenne : il a ainsi œuvré dans les années 1990 pour autoriser, par exemple, la commercialisation des associations variétales en Europe.

Pour en savoir plus

Bonhomme S., Budar F., Féral M. et Pelletier G., 1991. A 2,5 kb NcoI fragment of Ogura radish mitochondrial DNA is correlated with cytoplasmic male-sterility in *Brassica* cybrids. *Curr. Genet.*, 19 (2), 121-127.

Brown G.G., Formanova N., Jin H., Wargachuk R., Dendy C., Patil P., Laforest M., Zhang J., Cheung W.Y. et Landry B.S., 2003. The radish *Rfo* restorer gene of Ogura cytoplasmic male sterility encodes a protein with multiple pentatricopeptide repeats. *Plant J.*, 35, 262-272.

Brun H., Levivier S., Ruer D., Renard M. et Chèvre A.M., 2000. A field method for evaluating the potential durability of new resistance sources : application to the *Leptosphaeria maculans-Brassica napus* pathosystem. *Phytopathology*, 90 (9), 961-966.

Budar F., Delourme R. et Pelletier G., 2004. Male sterility. Dans : *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, T. Nagata, H. Lörz et J.M. Widholm (éd.), Springer Verlag, Berlin, 54, 43-64.

Campariol L., 2000. Hybrides de colza : encore du chemin à parcourir. *Semences Progr.*, 102, 10-21.

- Campos de Quiroz H. et Mithen R.**, 1996. Molecular markers for low-glucosinolate alleles on oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Mol. Breed.*, 2 (3), 277-281.
- Cavell A.C., Lydiate D.J., Parkin I.A.P., Dean C. et Trick M.**, 1998. Collinearity between a 30-centimorgan segment of *Arabidopsis thaliana* chromosome 4 and duplicated regions within the *Brassica napus* genome. *Genome*, 41 (1), 62-69.
- Chen Z.Z., Snyder S., Fan Z.G. et Loh W.H.**, 1994. Efficient production of doubled haploid plants through chromosome doubling of isolated microspores in *Brassica napus*. *Plant Breed.*, 113 (3), 217-221.
- Chèvre A.-M., Eber F., Baranger A. et Renard M.**, 1997. Gene flow from transgenic crops. *Nature*, 389 (6654), 924.
- Chèvre A.-M., Chèvre M., Choppy F., Serret C., Berks B. et Dale P.**, 1998. What about Crucifers during the XVIth century? *Acta Hortic.*, 459, 47-54.
- Chèvre A.-M., Eber F., Darmency H., Fleury A., Picaul H., Letanneur J.C. et Renard M.**, 2000. Assessment of interspecific hybridization between transgenic oilseed rape and wild radish under normal agronomic conditions. *Theor. Appl. Genet.*, 100, 1233-1239.
- Choné E.**, 2002. Huiles alimentaires et industrielles. *Sél. Fr.*, 53, 87-96.
- Clive J.**, 2001. Global review of commercialized transgenic crop : 2000. *ISAAA briefs*, 23, 111 p.
- Delourme R., Foisset N., Horvais R., Barret P., Champagne G., Cheung W.Y., Landry B.S. et Renard M.**, 1998. Characterisation of the radish introgression carrying the *Rfo* restorer gene for the *Ogu*-INRA cytoplasmic male sterility in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 97, 129-134.
- Delourme R. et Budar F.**, 1999. Male Sterility. Dans : *Biology of Brassica coenospecies*. C. Gomez-Campo, éd., Elsevier Science, Amsterdam, 185-216.
- Delseny M., Bourgis F. et Roscoe T.J.**, 1999. Le colza érucique : problèmes et perspectives. *OCL*, 6, 428-434.
- Desloire S., Gherbi H., Laloui W., Marhadour S., Clouet V., Cattolico L., Falentin C., Giancola S., Renard M., Budar F., Small I., Caboche M., Delourme R. et Bendahmane A.**, 2003. Identification of the fertility restoration locus, *Rfo*, in radish, as a member of the pentatricopeptide-repeat protein family. *EMBO Rep.*, 4, 588-593.
- Foisset N., Delourme R., Barret P. et Renard M.**, 1995. Molecular tagging of the dwarf Breizh (*Bzh*) gene in *Brassica napus*. *Theor. Appl. Genet.*, 91 (5), 756-761.
- Foisset N., Delourme R., Barret P., Hubert N., Landry B.S. et Renard M.**, 1996. Molecular-mapping analysis in *Brassica napus* using isosyme, RAPD and RFLP markers on a doubled-haploid progeny. *Theor. Appl. Genet.*, 93 (7), 1017-1025.
- Fourmann M., Charlot F., Froger N., Delourme R. et Brunel D.**, 2001. Expression, mapping, and genetic variability of *Brassica napus* disease resistance gene analogous. *Genome*, 44 (6), 1083-1099.
- Fry J., Barnason A. et Horsch R.B.**, 1987. Transformation of *Brassica napus* with *Agrobacterium tumefaciens* based vectors. *Plant Cell Rep.*, 6 (5), 321-325.
- Giancola S., Marhadour S., Desloire S., Clouet V., Falentin-Guyomarc'h H., Laloui W., Falentin C., Pelletier G., Renard M., Bendahmane A., Delourme R. et Budar F.**, 2003. Characterization of a radish introgression carrying the *Ogu* fertility restorer gene *Rfo* in rapeseed, using the *Arabidopsis* genome sequence and radish genetic mapping. *Theor. Appl. Genet.*, 107, 1442-1451.
- Gourret J.P., Delourme R. et Renard M.**, 1992. Expression of *Ogu* cytoplasmic male sterility in hybrids of *Brassica napus*. *Theor. Appl. Genet.*, 83 (5), 549-556.
- Guerche P., De Almeida E.R.P., Schwarzstein M.A., Gander E., Krebbers E. et Pelletier G.**, 1990. Expression of the 2S albumin from *Bertholletia excelsa* in *Brassica napus*. *Mol. Gen. Genet.*, 221 (3), 306-314.
- Hu J. et Quiros C.F.**, 1996. Application of molecular markers and cytogenetic stocks to *Brassica* genetics, breeding and evolution. *Acta Hortic.*, 407, 79-85.

- Huang J., Rozelle S., Pray C. et Wang Q.**, 2002. Plant biotechnology in China. *Science*, 295 (5555), 674-677.
- Jean M., Brown G.G. et Landry B.S.**, 1997. Genetic mapping of nuclear fertility restorer genes for the « Polima » cytoplasmic male sterility in canola (*Brassica napus* L.) using DNA markers. *Theor. Appl. Genet.*, 95 (3), 321-328.
- Koizuka N., Imai R., Fujimoto H., Hayakawa T., Kimura Y., Kohno-Urase J., Sakai T., Kawasaki S. et Imamura J.**, 2003. Genetic characterization of a pentatricopeptide repeat protein gene, orf687, that restores fertility in the cytoplasmic male-sterile Kosena radish. *Plant J.*, 34, 407-415.
- Lombard V. et Delourme R.**, 2001. A consensus linkage map for rapeseed (*Brassica napus* L.) : construction and integration of three individual maps from DH populations. *Theor. Appl. Genet.*, 103, 491-507.
- Luciani A.**, 2004. Le colza oléagineux. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 47-67.
- Murphy D.J., Richards D., Taylor R., Capdevielle J., Guillemot J.C., Grison R., Fairbairn D. et Bowra S.**, 1994. Manipulation of seed oil content to produce industrial crops. *Ind. Crop. Prod.*, 3 (1/2), 17-27.
- Ogura H.**, 1968. Studies on the new male sterility in japanese radish, with special references to the utilization of this sterility towards the practical raising of hybrid seeds. *Mem. Fac. Agric. Kagoshima Univ.*, (6) 2, 39-78.
- Pelletier G., Primard C., Vedel F., Chétrit P., Remy R., Rousselle P. et Renard M.**, 1983. Intergeneric cytoplasmic hybridization in *Cruciferae* by protoplast fusion. *Mol. Gen. Genet.*, 191, 244-250.
- Pilet M.L., Delourme R., Foisset N. et Renard M.**, 1998. Identification of QTL involved in field resistance to light leaf spot (*Pyrenopeziza brassicae*) and blackleg resistance (*Leptosphaeria maculans*) in winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 97 (3), 398-406.
- Renard M., Loutier J.H. et Duke L.H.**, 1991. Le colza. Dans : *Méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évolution du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE Éditions, Paris, 161-172.
- Renard M., Brun H., Chèvre A.M., Delourme R., Guerche P., Mesquida J., Morice J., Pelletier G. et Primard C.**, 1992. Le colza oléagineux. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 135-145.
- Renard M., Delourme R., Mesquida J., Pelletier G., Primard C., Boulinard C., Doré C., Ruffio V., Hervé Y. et Morice J.**, 1992. Male sterilities and F₁ hybrids in *Brassica*. Dans : *Reproduction Biology and Plant Genetics*, Y. Dattée, C. Dumas et A. Gallais, éd. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 107-119.
- Rives M.**, 1957. Études sur la sélection du colza d'hiver. *Ann. Amélior. Plant.*, 1, 61-107.
- Roscoe T., Maisonneuve S. et Delseny M.**, 2002. Production of unusual fatty acids in rapeseed. *OCL*, 9 (1), 24-30.
- Rouxel T., Penaud A., Pinochet X., Brun H., Gout L., Delourme R., Schmidt J. et Balesdent M.H.**, 2003. A 10-year survey of populations of *Leptosphaeria maculans* in France indicates a rapid adaptation towards the *Rlm1* resistance gene of oilseed rape. *Eur. J. Plant Pathol.*, 109, 871-881.
- Sageret A.**, 1826. Considérations sur la production des hybrides, des variantes et des variétés en général et sur celles de la famille des Cucurbitacées en particulier. *Ann. Sci. Nat.*, 8, 294-314.
- Shinatani D. et Dellapenna D.**, 1998. Elevating the vitamin E content of plant through metabolic engineering. *Science*, 282, 2098.
- Slabas A.R., White A., O'Hara P. et Fawcett T.**, 2002. Investigations into the regulation of lipid biosynthesis in *Brassica napus* using antisense down-regulation. *Biochem. Soc. Trans.*, 30, 1056-1059.
- Somers D.J., Rakow G., Prabhu V.K. et Friesen K.R.D.**, 2001. Identification of a major gene and RAPD markers for yellow seed coat colour in *Brassica napus*. *Genome*, 44 (6), 1077-1082.

- Stefansson B.R. et Downey R.K.**, 1995. Rapeseed. Dans : *Harvest of gold : The history of field crop breeding in Canada*. A.E. Slinkard et D.R. Knott, éd., University Extension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, 140-152.
- Stringam G.R. et Downey R.K.**, 1973. Haploid frequencies in *Brassica napus*. *Can. J. Plant Sci.*, 53 (1), 229-231.
- Taylor D.C., Katavic V., Zou J., Mackensie S.L. et Keller W.A.**, 2002. Amélioration de la teneur en huile, de la teneur en acide érucique et du rendement en graines du colza transgénique soumis à des essais au champ. *Bulletin IBP*, 1, 10-15.
- Vanderkerckhove J., Botterman J., De Block M., Vandewiele M., De Clercq A., Leemans J., Van Montagu M. et Krebbers E.**, 1989. Enkephalins produced in transgenic plants using modified 2S seed storage proteins. *Bio/Technol*, 7 (9), 929-932.
- Vermeersch G.**, 2001. Development of a biodiesel activity. *OCL*, 8 (1), 33-38.
- Vermeersch G.**, 2002. Biocarburants : la Commission propose d'encourager leur utilisation. *OCL*, 9 (1), 14-15.
- Zhang H.X., Hodson J.N., Williams J.P. et Blumwald E.**, 2001. Engineering salt-tolerant *Brassica* plants : characterization of yield and seed oil quality in transgenic plants with increased vacuolar sodium accumulation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98 (22), 12832-12836.
- Zhang J., Cheung W.Y. et Landry B.S.**, 2003. The radish *Rfo* restorer gene of *Ogura* cytoplasmic male sterility encodes a protein with multiple pentatricopeptide repeats. *Plant J.*, 35, 262-272.

Le dactyle pelotonné

Dactylis glomerata L. subsp. *glomerata* L. (généralement $2n = 4x = 28$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation de l'espèce

Le genre *Dactylis* ne comprend qu'une seule espèce (*Dactylis glomerata* L.) et environ 20 sous-espèces. Il est originaire d'Eurasie et du Bassin méditerranéen. Le dactyle était probablement diploïde à l'origine. Les plantes tétraploïdes seraient apparues après des changements climatiques (glaciations). Le dactyle a été introduit en Amérique, en Nouvelle-Zélande et en Australie à partir du XVII^e siècle par l'intermédiaire de colons venus d'Europe de l'Ouest. À l'heure actuelle, il existe 15 sous-espèces diploïdes, 3 sous-espèces tétraploïdes et une entité hexaploïde de l'espèce *Dactylis glomerata*. En agriculture, les deux sous-espèces les plus utilisées, dont *Dactylis glomerata* subsp. *glomerata* L. (dactyle pelotonné), sont tétraploïdes.

Le dactyle pelotonné est une plante pérenne, autotétraploïde, allogame et anémophile qui est multipliée par semences. La pollinisation des dactyles spontanés par des dactyles cultivés est minime du fait du décalage entre les périodes de reproduction : les variétés récentes sont en effet tardives à l'épiaison et sont souvent exploitées avant la floraison.

La diversité est importante dans cette espèce qui croît à l'état spontané dans tout le continent eurasiatique sous les climats tempérés, continentaux et méditerranéens.

La plus importante banque de gènes du genre *Dactylis* reconnue par l'IPGRI est localisée au *Plant Breeding and Acclimatization Institute* (PBAI) à Radzikow, en Pologne. Des sélectionneurs privés ainsi que l'INRA ont réalisé de nombreuses prospections. La collection de l'INRA contient plus de 500 génotypes de dactyle pelotonné qui ont alimenté le réseau national de ressources génétiques. Mais, le manque de moyens dégagés pour la conservation de ces ressources génétiques peut conduire au risque de la perte d'un certain nombre de variétés anciennes et de populations qui n'existent plus *in situ*.

Production et utilisation

Le produit récolté est la partie aérienne, de préférence avant épiaison.

Le dactyle est l'une des trois graminées fourragères les plus cultivées en Europe. Il serait cultivé sur plus de 600 000 ha en France. Sa culture commence à se répandre aussi aux États-Unis, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Le dactyle est une graminée fourragère appréciée du fait de sa pérennité (6 à 8 ans), de sa bonne productivité (12 à 15 tonnes de matière sèche par an), de son appétibilité correcte et de sa résistance à la sécheresse. Un autre point important est que le dactyle est probablement la graminée qui fournit le plus de protéines à l'hectare. Bien que difficile et lent à s'implanter et peu riche en glucides, il présente une forte compétitivité une fois installé. Il peut se cultiver seul ou en association avec la luzerne (*Medicago sativa* L.) principalement, ainsi qu'avec le lotier corniculé (*Lotus corniculatus* L.) ou le trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) ou en mélange complexe plurispécifique comprenant d'autres graminées et des légumineuses. Le dactyle peut être pâturé, ensilé (ou fané).

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Le dactyle a d'abord été uniquement présent sous forme de populations naturelles réparties dans toutes les régions de France.

Au moment de la révolution fourragère (lancée dans les années 1950), la sélection française n'ayant pas encore créé de variétés, la demande de variétés de dactyle n'a pu être satisfaite qu'avec des variétés synthétiques danoises comme '**Phyllox**' (Daehnfeld, Danemark) ou néerlandaises comme '**Barenza**' (Barenburg, Pays-Bas) trop sensibles aux rouilles. L'utilisation de ces variétés inadaptées aux conditions françaises a eu longtemps un effet néfaste sur le développement de la culture de dactyle (notamment en Bretagne, première région à avoir mis en place des cultures de dactyle).

L'arrivée des premières variétés sélectionnées en France plus résistantes aux rouilles, a contribué, de façon définitive, au développement de la culture du dactyle.

1957, '**Ariès**' (Vilmorin-Andrieux, France), variété synthétique très précoce, recommandée dans le sud de la France.

1957, '**Germinal**' (INRA, France), variété synthétique précoce, un peu plus tolérante aux rouilles qu'Ariès'.

1957, '**Floréal**' (INRA, France), variété synthétique semi-précoce. Cette variété est très productive et présente une bonne tolérance aux maladies. Elle permet d'obtenir de bonnes performances animales. Toutes ces qualités lui ont valu de connaître un certain succès commercial.

1957, '**Prairal**' (INRA, France), variété synthétique tardive, très bonne grainière se distinguant par une bonne tolérance aux rouilles. Cette variété a connu une très grande réussite commerciale.

1965, **‘Dapprime’** (Clause, France), variété synthétique semi-tardive qui peut être considérée comme la première ayant une bonne souplesse d’exploitation, grâce notamment à sa capacité de reprise de végétation précoce au printemps.

Variétés récentes

1978, **‘Lude’** (INRA, France), variété synthétique semi-tardive, se distinguant par ses qualités : état sanitaire, appétibilité et digestibilité. Elle a eu une belle carrière commerciale.

1978, **‘Lutetia’** (INRA, France), variété synthétique. C’est la variété de pâture, par excellence. Elle possède le défaut d’être devenue très sensible aux rouilles à la suite d’une dérive génétique.

1990, **‘Athos’** (Green Genetics, France), variété synthétique tardive, très utilisée dans les Pyrénées. C’est une variété de pâture résistante aux rouilles.

1991, **‘Porthos’** (Green Genetics, France), variété synthétique tardive destinée à l’ensilage qui se caractérise par une grande souplesse d’exploitation (12 jours gagnés au printemps par rapport au témoin CTPS ‘Lutetia’) et possédant, de plus, une bonne qualité sanitaire.

1992, **‘Lupré’** (INRA, France), variété synthétique tardive, possédant une grande souplesse d’utilisation, une grande productivité et une qualité fourragère accrue. Elle connaît une grande réussite commerciale.

1996, **‘Starly’** (RAGT, France), variété synthétique tardive qui se distingue par sa capacité à produire d’abondantes repousses en été et en automne.

1997, **‘Medly’** (INRA, France), variété synthétique intermédiaire, très résistante à la sécheresse du fait de l’introduction d’une dormance estivale. Cette variété est particulièrement bien adaptée aux régions méditerranéennes.

1998, **‘Luron’** et **‘Ludovic’** (INRA, France), variétés synthétiques tardives possédant des qualités agronomiques qui augmentent l’intérêt du dactyle (implantation rapide, allongement de la durée annuelle de production d’herbe, résistance aux maladies).

2002, **‘Luflor’** (INRA, France), première variété dont le schéma de production de semences utilise une stérilité mâle. C’est une variété semi-hybride F₁.

Remarque. Les programmes de sélection ont été à l’origine du lancement de collectes et du maintien de collections. Sans ces collections, les populations naturelles auraient peut-être disparu du fait de l’avancée de l’urbanisation ou de la culture de certaines plantes telles que le maïs (*Zea mays* L. subsp. *mays*). Les nombreux génotypes récoltés en Bretagne, au nord-ouest de la Galice (Espagne), au Portugal et en Région méditerranéenne ont été utilisés avec succès pour créer des variétés performantes (Bretagne [‘Lude’ et ‘Lupré’], Bretagne et Galice [‘Luron’ et ‘Ludovic’], Maroc [‘Medly’]). L’amélioration des plantes, en ayant permis la recombinaison de génomes d’origines géographiques très différentes, a donc été une source importante de création de variabilité.

Regard sur 50 ans de sélection

Le dactyle a d'abord été uniquement présent sous forme de populations naturelles, réparties dans toutes les régions de France et ayant chacune des caractéristiques particulières. Le dactyle n'a vraiment commencé à être cultivé en France que depuis la révolution fourragère, c'est-à-dire au début des années 1950.

Dans un premier temps, seules étaient cultivées des variétés danoises et néerlandaises. L'INRA, en créant, en 1957, une série de variétés mieux adaptées aux conditions françaises de culture, a eu un rôle déterminant dans l'adoption de cette espèce. Le travail de recherche réalisé par l'INRA a eu aussi pour effet de motiver les entreprises françaises de sélection. Les variétés créées durant les 20 dernières années ont permis de maintenir, voire d'augmenter, les surfaces en dactyle. De grandes améliorations ont été obtenues notamment dans la facilité d'utilisation, la souplesse d'exploitation et la résistance aux rouilles. La qualité des prairies de dactyle a été nettement augmentée, ce qui a été très profitable pour la nutrition animale. Les rouilles sont des maladies extrêmement importantes en France, contrairement aux autres pays européens. Il résulte de cette situation particulière que la grande majorité des variétés inscrites au catalogue officiel français sont des variétés sélectionnées en France.

Caractères importants améliorés

Vitesse d'implantation. Le dactyle a une implantation plutôt lente comparée à celle des autres graminées fourragères. Ce caractère a été fortement amélioré, ce qui permet aux nouvelles variétés d'être bien plus compétitives vis-à-vis des mauvaises herbes et d'être aussi mieux adaptées à l'utilisation en association ou en mélange. Une manière d'évaluer ce caractère est de mesurer la production de biomasse durant l'année d'implantation. Elle était de 7,5 tonnes de matière sèche (MS) par hectare pour les variétés de la fin des années 1950 alors qu'elle est supérieure à 9 t de MS/ha pour les variétés actuelles.

Allongement de la durée de croissance. La période annuelle de production s'est beaucoup allongée : 3 semaines ont été gagnées au printemps et à l'automne. Ceci se traduit par un meilleur étalement de la production avec des augmentations de rendement pour la première et la dernière coupe. À la fin des années 1950, 'Praisial' produisait en moyenne 2,7 t de MS/ha lors de la première coupe de déprimage et 1,4 t de MS/ha lors de la dernière coupe, les variétés récentes produisent respectivement plus de 3,8 t de MS/ha et plus de 1,9 t de MS/ha. À noter que la première coupe de déprimage correspond à une exploitation où les extrémités apicales ne sont pas sectionnées, elle se situe donc avant que les apex aient atteint, en moyenne, le stade épi à 10 cm dans la tige. Cette coupe de déprimage est intéressante à évaluer, car elle indique si une variété a un potentiel de croissance permettant, par exemple, une pâture au tout début du printemps.

Durée d'exploitation au printemps. Pour avoir une herbe de qualité, une prairie peut être exploitée au printemps à partir du moment où les animaux peuvent être mis au pâturage, c'est-à-dire lorsque l'herbe fait environ 20 cm de hauteur, et jusqu'au stade de l'épiaison qui représente l'optimum pour l'ensilage. Le manque de souplesse d'exploitation au printemps était un des problèmes importants rencontrés dans la culture du dactyle. La sélection a permis d'obtenir des améliorations remarquables. En effet, dans certaines formes sauvages, cette durée d'exploitation est réduite, la montée des tiges apparaissant peu de temps après la reprise de croissance. Avec les variétés de type 'Prairial', la durée possible d'exploitation au printemps était de 32 jours. Pour les variétés récentes, elle est de plus de 52 jours.

Résistance aux maladies

Les rouilles (*Puccinia graminis Pers.* et *P. glumarum (Schm.) Erikss. et Henn.*). Ces maladies fongiques d'été et d'automne sont susceptibles d'occasionner de grandes pertes de rendement et de qualité de l'herbe du fait d'une sénescence accélérée de la plante et de l'épuisement de ses réserves en glucides. Les variétés sensibles souffrent, régulièrement, de baisses de rendement de plus de 20 % à l'automne. De même, de fortes attaques de rouilles sur des variétés sensibles occasionnent des baisses d'appétibilité pouvant atteindre 60 %. Enfin, ces maladies provoquent une baisse de la pérennité ainsi qu'un retard dans la reprise de la végétation au printemps. Les variétés inscrites au catalogue officiel français sont, en général, plus tolérantes à ces maladies que les variétés inscrites sur les catalogues étrangers.

La mastigosporiose (*Mastigosporium rubicosum (Dearn. et Barth.) Nannf.*). Cette maladie fongique de printemps et d'automne (temps humide et frais) affecte aussi négativement la productivité, la pérennité et la reprise en végétation au printemps. La mastigosporiose est particulièrement néfaste pour la qualité du dactyle en fourrage. En effet, les plantes ayant 10 % de leur surface foliaire atteinte, ont une teneur en glucides solubles diminuée de moitié. Bien que les progrès obtenus aient été moins importants que ceux obtenus pour les rouilles, il faut noter que des variétés plus tolérantes à cette maladie ont été sélectionnées.

La scolécotrichose (*Scolecotricum graminis Fuckel*). Cette maladie fongique d'été et d'automne est aussi très pénalisante pour la culture du dactyle. Les plantes, infectées par cette maladie, ont notamment des teneurs très réduites en protéines et en lipides. Bien que les progrès obtenus aient été moins importants que pour les rouilles, il est important de noter qu'en moyenne, la tolérance à la scolécotrichose a sensiblement augmenté dans les nouvelles variétés.

Qualité du fourrage. Les nouvelles variétés sont plus appétibles, plus digestibles et ont une meilleure ingestibilité que les variétés anciennes.

Difficultés et obstacles

Potentiel de production. Des progrès importants ont été obtenus dans l'étalement de la production au printemps et en automne. La durée totale annuelle d'exploitation s'est donc considérablement allongée, notamment en pâture. Cependant, la production totale annuelle n'a presque pas évolué. Elle était de 13,5 t de MS/ha à la fin des années 1950 et elle n'est que de 14,8 t de MS/ha à l'heure actuelle. Le progrès réalisé sur le rendement total est donc très faible : 2 % tous les 10 ans.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	AUCUNE
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Les populations naturelles sont diploïdes ou tétraploïdes. Les variétés cultivées en France sont toutes tétraploïdes. Les quelques variétés diploïdes obtenues au Royaume-Uni ('Sylvan' ou 'Conrad') ont une appétibilité moindre que les variétés tétraploïdes.
Transgénèse	AUCUNE
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI La multiplication végétative se fait par simple division de touffes.
Sélection sanitaire	OUI
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	OUI Une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique a été découverte dans du matériel canadien. Il a fallu améliorer longuement ce matériel mâle stérile car il était, entre autres, extrêmement sensible aux rouilles. Il est utilisé, depuis peu, dans la création des variétés « semi-hybrides F ₁ » ('Luflor') (cf. encadré p. 288). ESSAIS Castration chimique.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Une certaine incompatibilité est présente dans environ 10 % des génotypes. Celle-ci ne constitue pas une véritable gêne pour la création variétale.
Marquage moléculaire	OUI L'étude du polymorphisme de 5 systèmes enzymatiques sert à identifier le matériel.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Un schéma de sélection récurrente familiale et individuelle, avec des cycles successifs de 3 ans comprenant des tests de valeur agronomique, suivi d'intercroisements par production de pleins-frères en petits diallèles (4×4) déconnectés ou de demi-frères selon le schéma polycross, est utilisé pour faire des variétés synthétiques ('Lupré', 'Ludac', 'Luron',...).
Types variétaux	Population naturelle Variété synthétique. La très grande majorité des variétés sont de ce type. Variété « semi-hybride F_1 ». Elles sont réalisées à l'aide d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique. Les variétés contiennent 80 % d'hybrides et 20 % de parents pollinisateurs ('Luflo').

Perspectives d'amélioration

Le principal intérêt du dactyle est son utilisation pour réaliser des prairies pérennes. Ceci permet de moins retourner la terre et d'éviter de laisser le sol nu, diminuant ainsi les risques d'érosion et de lessivage azoté. Le dactyle est la graminée la mieux adaptée aux sols secs car elle a la meilleure capacité de croissance estivale : le dactyle produit du fourrage de qualité, même l'été, en l'absence d'irrigation. La culture du dactyle est aussi intéressante car elle permet de valoriser les sols pauvres. Enfin, le dactyle est la graminée fourragère qui produit le plus de protéines à l'hectare. Ces quatre qualités confèrent au dactyle une très bonne capacité d'adaptation au développement d'une agriculture raisonnée.

Caractères à améliorer

Productivité. La période annuelle de production peut encore être allongée notamment grâce à la maîtrise de la tolérance au froid.

Qualité du fourrage. Il existe encore, au niveau de la digestibilité, une grande variabilité qu'il reste à exploiter.

Capacité de la culture en conditions de faibles intrants. Ce critère n'a pas été pris en compte directement jusqu'à présent.

Précocité. Il n'existe plus de variétés précoces en France. Néanmoins, de telles variétés pourraient être intéressantes en zone méditerranéenne.

Techniques à développer

Les variétés « semi-hybrides F_1 », basées sur l'utilisation d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique, devraient se développer du fait qu'elles exploitent mieux l'hétérosis que les variétés synthétiques (cf. encadré p. 288).

Exploitation de l'hétérosis chez le dactyle

Jusqu'à présent, l'hétérosis était exploitée dans des structures variétales de type « variétés synthétiques ». Très récemment, des variétés ('Luflor', 'Lunella' et 'Lumont') possédant une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique ont été sélectionnées. Ces variétés sont des variétés « semi-hybrides F_1 ». Il s'agit, en effet, de mélanges contenant environ 80 % de graines hybrides F_1 et environ 20 % de graines provenant des pollinisateurs. Ce type variétal, même s'il n'est pas aussi élaboré que la structure hybride F_1 , permet néanmoins de mieux exploiter l'hétérosis que la variété synthétique traditionnelle. Cependant, les problèmes techniques que pose la production d'une telle structure sont nombreux. La production de semences est délicate et pourra être une étape limitante dans le développement commercial de ce type de variétés.

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue plantes fourragères avec création des listes A et B.

En 2004, 30 variétés de dactyle étaient inscrites au catalogue officiel français (dont 27 en liste A) et 112 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 3 années. À l'issue de cette période d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. La section CTPS plantes fourragères et à gazon a fixé des dispositions qui ont pour objectif de contrôler le biais dans l'appréciation de la VAT dû à la présence d'endophytes dans les essais officiels pour les espèces de graminées fourragères et à gazon. En attendant la définition d'un protocole officiel de contrôle au laboratoire de la qualité des semences utilisées dans les essais VAT, la section du CTPS demande au déposant une attestation spécifiant que le lot de semences contient plus de 80 % de semences indemnes d'endophytes vivants. La variété est testée pendant 3 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence choisis parmi les variétés les plus utilisées.

Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Pour en savoir plus

- Christie B.R.**, 1971. *Dactylis*. Agricultural Research Institute of Ontario. *Annual report 1971 to 1972*, Dep. Crop Sci., Ont. Agric. Coll., Guelph Univ., Guelph, Canada, 336 p.
- Christie B.R.**, 1973. Performance of hybrids in orchard grass (*Dactylis glomerata*). *Can. J. Plant Sci.*, 53 (4), 783-789.
- Christie B.R. et Krakar P.J.**, 1980. Performance of advanced generation hybrids of orchard grass (*Dactylis glomerata* L.). *Can. J. Plant Sci.*, 60 (2), 479-483.
- Gallais A.**, 1979. Application du concept d'aptitude variétale à la théorie de la sélection des variétés synthétiques chez les diploïdes et les autopolyploïdes. *Ann. Amélior. Plant.*, 29, 111-129.
- Gillet M.**, 1980. Le dactyle. Dans : *Les graminées fourragères*. Éditions Gauthier-Villars, Paris, 263-267.
- GNIS**, 2000. *L'amélioration des plantes fourragères*. Collection « Agriculture et sélection végétale ». Cédérom, Édition GNIS, Paris.
- Huyghe C.**, 2002. 40 ans d'amélioration des espèces fourragères pérennes : acquis et perspectives. *Sél. Fr.*, 53, 41-54.
- Huyghe C.**, 2005. *Prairies et cultures fourragères en France : entre logiques de production et enjeux territoriaux*. INRA Éditions, Paris, 224 p.
- Mousset C.**, 1992. Le dactyle. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 287-298.
- Mousset C.**, 1995. Les dactyles ou le genre *Dactylis*. Dans : *Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon*. J.-M. Prosperi, P. Guy et F. Balfourier, éd., INRA Éditions, Paris, 25 p.
- Mousset C.**, 2000. Rassemblement, utilisation et gestion des ressources génétiques de dactyle à l'INRA de Lusignan. *Fourrages*, 162, 121-139.
- Prosperi J.-M., Guy P. et Balfourier F.**, 1995. *Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon*. INRA et BRG Éditions, Paris, 219 p.
- RAGT**, 1999. *Le mémento de l'herbe*. RAGT, Rodez, 53 p.

La fétuque élevée

Festuca arundinacea Schreb. (principalement $2n = 6x = 42$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation de l'espèce

Les analyses génomiques indiquent maintenant clairement que la fétuque élevée *Festuca arundinacea* Schreb. est une espèce allopolyploïde (généralement hexaploïde) issue du croisement entre la variété botanique tétraploïde *F. arundinacea* Schreb. var. *glaucescens* Boiss. et la fétuque des prés, *F. pratensis* Huds. (diploïde). Cette espèce prairiale s'est répandue au sud et au nord de la Méditerranée et de l'Atlantique à la Sibérie. Ultérieurement, elle a été introduite sur les autres continents.

Cette espèce est pérenne, allogame, anémophile et multipliée par semences. Lorsque la fétuque est exploitée en fourrage, elle est récoltée avant la floraison : il y a alors peu de possibilités de pollinisation des espèces sauvages par les espèces cultivées. Par contre, lorsqu'il s'agit d'une prairie pâturée, il peut y avoir floraison et donc dissémination du pollen. C'est également le cas lors de la production de semences.

Festuca arundinacea est une espèce très répandue dans le monde. Sa grande variabilité génétique, notamment pour des caractères tels que la morphologie et le rythme de végétation, lui a permis de s'adapter à des milieux très variés allant du cercle polaire au Sahara. La diversité naturelle existe et reste importante en France et en Europe. Des banques de gènes ont été établies grâce à des prospections. Ainsi, l'INRA a réalisé plusieurs prospections dans les années 1970-80 ayant permis de récolter plus de 500 écotypes. La collection nationale de fétuque élevée est maintenue de façon satisfaisante en particulier grâce aux sélectionneurs qui conservent les anciennes variétés radiées du catalogue français, la disparition de certains obtenteurs ayant toutefois parfois entraîné la perte d'un certain nombre de variétés anciennes. En revanche, la grande diversité inter- et intraspécifique des fétuques est menacée là où elle est la plus riche, c'est-à-dire dans les pays du Maghreb, en raison du surpâturage et de la mise en culture des sols les plus favorables.

Production et utilisation

Le produit récolté est l'herbe, la partie aérienne de la plante, de préférence au stade végétatif.

La fétuque élevée est appréciée du fait que c'est l'une des espèces fourragères les plus pérennes (plus de 10 ans) et la plus productive (15 à 18 t de MS/ha/an). Elle possède aussi l'intérêt d'être adaptée à tous les types de sols. Son système racinaire est particulièrement développé en sol profond et sa tenue à la submersion est remarquable. Ses principaux défauts sont une implantation lente et difficile et une appétibilité médiocre qui fait que les animaux préfèrent manger d'autres espèces.

La fétuque élevée est utilisée en ensilage, pour faire du foin, et en pâture. Elle peut éventuellement être associée au trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) ou à la luzerne (*Medicago sativa* L.).

Certaines variétés de fétuque élevée servent à la réalisation de gazon pour terrains de sport et d'agrément. Pour cette destination, la fétuque fait l'objet d'une sélection bien particulière. Le marché des semences de fétuque élevée pour le gazon est maintenant supérieur à celui du marché pour le fourrage (environ le double en France avec près de 25 000 quintaux).

Histoire des variétés cultivées en France

La fétuque a d'abord été uniquement présente sous forme de populations naturelles réparties dans toutes les régions de France.

Variétés sélectionnées

Années 1940, '**Kentucky 31**' (Station expérimentale de Lexington, université du Kentucky, États-Unis), variété nord-américaine qui a connu une carrière commerciale exceptionnelle : elle, seule, a été cultivée de manière significative (sur des millions d'hectares) aux États-Unis au début des années 1950, mais elle n'a pas été cultivée en France.

1957, '**Manade**' (Vilmorin-Andrieux, France), variété synthétique, à épiaison précoce et très pérenne. Cette variété a été la première sélectionnée en France.

1971, '**Clarine**' (INRA, France), variété synthétique de clones, semi-tardive, productive et tolérante à la sécheresse.

1971, '**Ludelle**' (INRA, France), variété issue de croisements de lignées. Cette variété se caractérise par un feuillage flexible et une bonne digestibilité. Elle est cependant peu productive en semences.

1977, '**Kenhy**' (université du Kentucky et USDA, États-Unis), variété nord-américaine se caractérisant par une appétibilité satisfaisante, caractère apporté par l'introggression d'un fragment de chromosome de ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.).

1981, '**Barcel**' (Barenbrug Holland, Pays-Bas), variété synthétique de clones ayant un feuillage flexible et une bonne digestibilité. Cette variété est aussi

bonne productrice de semences, ce qui lui a permis d'avoir un bon développement commercial. Cette variété présente néanmoins le défaut d'avoir une mauvaise production estivale associée à une sensibilité aux rouilles.

1981, '**Lubrette**' (INRA, France / Clause, France), variété synthétique de clones se distinguant par une appétibilité nettement améliorée et une très bonne résistance aux rouilles. Cette variété présente néanmoins le défaut d'avoir une mauvaise production estivale.

1981, '**Ondine**' (INRA, France), variété semi-précoce se distinguant par sa structure variétale : pseudo-hybride double de clones S3/S4.

1982, '**Bartès**' (Loft's Seed, États-Unis), première variété véritablement à gazon. Elle se démarque des variétés fourragères par des feuilles un peu moins larges et plus courtes, un tallage plus important, d'où une capacité à former un tapis végétal dense avec une croissance réduite et une aptitude supérieure à tolérer les tontes basses. Elle est à l'origine d'un grand nombre de variétés des États-Unis.

1991, '**Lutine**' (INRA, France), variété synthétique de familles ($2n = 70$ à 84), qui est issue d'un croisement interspécifique entre une fétuque méditerranéenne et une fétuque européenne. Cette variété semi-tardive se caractérise par un allongement de la période de pousse (c'est-à-dire par un démarrage très précoce de la croissance au printemps), une amélioration de l'appétibilité et une très bonne résistance aux rouilles. Par contre, sa capacité de production de semences est un peu faible et sa sensibilité au froid conduisent à la réserver aux zones à hiver doux.

1998, '**Amalia**' (RAGT, France), variété synthétique, à gazon, issue d'un croisement entre des fétuques d'origine européenne. Elle est remarquable par son feuillage vert clair et par son aspect esthétique de bon niveau tout au long de l'année contrairement aux variétés des États-Unis, plus dormantes en été et surtout en hiver.

1999, '**Dulcia**' (RAGT, France), variété synthétique, semi-tardive qui est un bon compromis entre l'amélioration de la qualité du fourrage (souplesse du feuillage et digestibilité) et le niveau de production de matière sèche.

Remarque. Il y a plutôt une augmentation de la variabilité : des prospections sont souvent réalisées, les échanges de matériel se sont généralisés et il y a de nombreux croisements.

Regard sur 50 ans de sélection

La fétuque élevée n'a vraiment commencé à être cultivée en France que depuis la révolution fourragère, c'est-à-dire au début des années 1950, cette espèce étant particulièrement bien adaptée à la constitution de stocks fourragers et valorisant bien les apports azotés. Le travail de recherche réalisé par l'INRA a eu pour effet de motiver les entreprises françaises de sélection.

L'amélioration de cette espèce a essentiellement consisté à estomper ses principaux défauts (installation lente et mauvaise appétibilité). La complexité de sa génétique et de son système de reproduction a limité les progrès réalisés.

L'utilisation de la fétuque élevée comme fourrage ou comme gazon correspond à deux orientations différentes avec des objectifs de rendement opposés : pour le fourrage, il faut gagner en productivité tandis que pour le gazon il faut réduire la production de matière sèche tout en conservant l'aspect vert. C'est en gazon que les progrès obtenus par la sélection sont les plus manifestes.

Caractères importants améliorés

Qualité fourragère. La qualité fourragère, en particulier, la souplesse du feuillage, caractère intervenant fortement dans l'appétibilité, a été très fortement améliorée. Le passage des variétés à feuilles rigides aux variétés à feuilles souples a fait évoluer la valeur fourragère de 0,70 UF à 0,76 UF. Cette augmentation s'est accompagnée de gains de production de l'ordre de 11 % en lait. Les variétés à feuillage souple ont maintenant atteint un niveau de productivité comparable à celui des variétés à feuillage rigide.

Économie d'azote. Les feuilles des variétés à feuilles rigides se durcissent avec l'âge et se dessèchent rapidement en été. De telles fétuques peuvent être refusées par les animaux. La solution pour éviter cet écueil consiste à exploiter très souvent la fétuque élevée. Ceci n'est possible qu'en augmentant la vitesse de pousse par une fertilisation azotée abondante. Les variétés à feuilles souples peuvent donc être exploitées de manière moins intensive.

Résistance aux maladies. De gros progrès ont été réalisés notamment pour la tolérance à la rouille noire (*Puccinia graminis*) et à la rouille couronnée (*P. coronata*). Ces résistances permettent l'exploitation de prairies de fétuque élevée sans traitement fongicide.

Étalement de la production fourragère. L'étalement de la production a été augmenté, ce qui permet une plus grande souplesse d'utilisation. Les dates de démarrage en végétation entre les variétés les plus précoces et les plus tardives s'échelonnent sur un mois.

Aspect des variétés à gazon. Les variétés européennes avaient l'avantage d'être bien adaptées aux conditions pédoclimatiques françaises, mais avaient aussi le défaut de jaunir en été et d'avoir un feuillage un peu clair, peu apprécié des utilisateurs. Les travaux de sélection, menés dans un premier temps surtout aux États-Unis ont conduit à des variétés ayant des feuilles de moins en moins grossières et plus courtes et avec un tallage plus important qui apporte une croissance plus lente, caractères recherchés pour la réalisation de gazons. Ces modifications se sont, par contre, accompagnées de dormances estivale et surtout hivernale prononcées. Le croisement entre des variétés européennes et nord-américaines a permis d'obtenir un matériel original, de couleur moins foncée que celles des

États-Unis, mais ne jaunissant pas l'hiver et assez peu l'été. L'amélioration de cette espèce a été spectaculaire au cours des vingt dernières années et il est probable que son emploi devienne incontournable dans les mélanges pour terrains de sport et d'agrément, pour peu que son implantation et son agressivité en association avec d'autres graminées soient améliorées. Elle présente aussi l'avantage de bien tolérer une ombre modérée et des sols moyennement salins.

Difficultés et obstacles

Les travaux de sélection n'ont pas permis, jusqu'à présent, d'améliorer la qualité fourragère tout en conservant l'ensemble des qualités agronomiques de la fétuque. C'est ainsi que toutes les variétés à feuilles souples possèdent le défaut d'avoir une croissance ralentie en été, même si la différence tend à s'estomper sur les variétés inscrites au cours des dernières années.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	OUI Des croisements entre différentes espèces de fétuque peuvent être réalisés. La fertilité des hybrides est restaurée par doublement du stock chromosomique ('Lutine'). Les croisements intergénériques entre fétuque élevée et ray-grass d'Italie, avec sauvetage d'embryons <i>in vitro</i> , sont pratiqués pour obtenir des variétés appartenant à une nouvelle espèce, le × <i>Festulolium</i> Asch. & Graebner ou pour introgresser des caractères ('Kenhy', 'Lofa').
Hybridation somatique	ESSAIS Des tentatives d'hybridation somatique sont réalisées par fusion de protoplastes de ray-grass et de fétuque élevée afin d'obtenir des × <i>Festulolium</i> .
Élévation du niveau de ploïdie	OUI La majorité des variétés de fétuque élevée est hexaploïde (42 chromosomes). Des variétés à 84 chromosomes, obtenues après croisements de fétuques continentales par des fétuques méditerranéennes, ont été sélectionnées ('Lutine').
Transgénèse	EN COURS 1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1992. Essais aux champs et commercialisation de variétés transgéniques. Des fétuques transgéniques ont fait l'objet de tests au champ, notamment en France et aux États-Unis. Les travaux continuent aux États-Unis. Actuellement, aucune variété transgénique de cette espèce n'est cependant autorisée à être commercialisée.

suite...

... suite

Caractères améliorés par transgénèse. Des plantes hypolignifiées ou résistantes aux herbicides à base de glufosinate d’ammonium, ont été obtenues.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Le bouturage naturel de talles sert à la production de variétés synthétiques.
Sélection sanitaire	OUI
Haploïdisation	ESSAIS Des essais d’induction de plantes haploïdes par culture d’anthers <i>in vitro</i> sont pratiqués pour tenter de stabiliser des hybrides × <i>Festulolium</i> au niveau diploïde.
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l’auto-incompatibilité	OUI L’auto-incompatibilité est gênante pour la réalisation de lignées partiellement homozygotes, mais très utile pour limiter la consanguinité au cours de la production des variétés synthétiques. Démontrée chez le ray-grass, il est vraisemblable qu’un système analogue existe chez la fétuque élevée, comme en témoigne un taux élevé de stérilité par autofécondation.
Marquage moléculaire	ESSAIS Des QTL de pérennité et de tolérance à la sécheresse sont recherchés. Les marqueurs sont utilisés pour suivre l’introgression de gènes de fétuque dans le genre <i>Lolium</i> .
MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection récurrente individuelle et familiale, multi-caractères (‘Dulcia’).
Types variétaux	Population naturelle Variété synthétique Variété synthétique de clones Variété hybride double de clone

Perspectives d’amélioration

La fétuque élevée reste une espèce fourragère secondaire en Europe et l’effort de recherche/sélection sur la fétuque n’a rien à voir avec celui consacré au ray-grass qui fait l’essentiel du marché des semences en Europe. Pourtant, plusieurs éléments pourraient changer cette situation :

- le développement actuel de la biologie moléculaire qui commence à transférer les résultats des espèces modèles et majeures vers les espèces secondaires ;
- le développement de grandes structures privées (telles que *Noble Foundation* aux États-Unis) qui vont consacrer un effort sans précédent pour expérimenter des OGM de fétuque ;

– l'orientation « gazon » qui est aussi une piste prometteuse pour cette espèce et que l'on ne soupçonnait pas ;

– enfin, la sphère « × *Festulolium* » qui offre une possibilité d'utilisation intéressante de la fétuque en tant qu'hybride et pourquoi pas comme donneur de « gènes », si l'on progresse d'une façon générale sur les bases génétiques des caractères d'intérêt chez les Graminées (*cf.* encadré p. 670).

De ce point de vue, l'avenir de toutes ces espèces pérennes (fourragères ou pour le gazon) sera de moins en moins indépendant de ce qui se fera sur les céréales, le maïs, le riz...

Caractères à améliorer

Qualité fourragère. Il faudrait aller plus loin dans l'amélioration de la qualité fourragère tout en ne négligeant pas la production fourragère et la productivité grainière.

Meilleure répartition de la production. L'amélioration de la production estivale fait partie des critères de sélection importants.

Présence ou absence d'endophytes. En Europe, des champignons symbiotiques, les endophytes de l'espèce *Neotyphodium coenophialum*, sont souvent présents dans les populations spontanées. Pour l'utilisation en fourrage, leur présence n'est pas souhaitable car ces endophytes produisent des alcaloïdes (l'ergovaline, par exemple), qui s'avèrent toxiques pour les animaux (*cf.* aussi encadré p. 672). En gazon, la présence d'endophytes, beaucoup moins contraignante, peut s'avérer intéressante (meilleur aspect hivernal et meilleure pérennité). Une première approche consiste à traiter les semences pour éliminer les endophytes, une seconde consiste à sélectionner ces derniers pour qu'ils ne produisent pas de substances toxiques. La présence de ces champignons peut en effet présenter un intérêt vis-à-vis de la tolérance aux stress.

Inscription et protection des variétés en France

1975, ouverture, par arrêté ministériel, de la liste des variétés de fétuque élevée dans le catalogue plantes fourragères.

En 2004, 34 variétés fourragères (+ 10 en fétuque des prés) et 42 variétés à gazon étaient inscrites au catalogue officiel français (liste A et B) et 55 variétés fourragères et 62 variétés à gazon au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 3 années. À l'issue de ces 3 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots

commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. La section CTPS plantes fourragères et à gazon a fixé des dispositions qui ont pour objectif de contrôler le biais dans l'appréciation de la VAT dû à la présence d'endophytes dans les plantes des parcelles d'essais du réseau officiel d'inscription au catalogue pour les espèces de graminées fourragères et à gazon. En attendant la définition d'un protocole officiel de contrôle au laboratoire, de la qualité des semences utilisées dans les essais VAT, la section du CTPS demande au déposant une attestation spécifiant que le lot de semences contient plus de 80 % de semences indemnes d'endophytes vivants. La variété est testée pendant 3 ou 4 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Deux variétés largement commercialisées et ayant une très bonne valeur agronomique constituent les témoins de référence. Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le CTPS a eu un rôle important dans l'orientation de la sélection de cette espèce en autorisant parmi les variétés fourragères l'inscription de variétés à feuilles souples, moins productives mais plus appétibles. Le CTPS a eu récemment également un rôle autour des questions de définition du *× Festulolium* et a contribué à modifier la définition auprès du Comité permanent des semences de la Commission des communautés européennes de Bruxelles. Celui-ci a voté, en 2004, la demande française d'élargissement de la notion de *× Festulolium* : désormais cette dénomination s'applique à toutes les variétés issues d'un croisement entre un ray-grass (de n'importe quelle espèce) et une fétuque (de n'importe quelle espèce), alors que précédemment, dans l'Union européenne le terme de *× Festulolium* était réservé aux variétés issues de croisements entre une fétuque des prés (*Festuca pratensis*) et un ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum*).

Pour en savoir plus

Site internet du rapport Ressources génétiques du DGAP-INRA : <http://www.inra.fr/Intranet/Departements/gap/actualite/infosgap/ressources-genetiques/Synthese-finale.pdf>

Bourgoin B., 2002. Point sur l'amélioration génétique des graminées destinées aux usages « gazon ». *Sél. Fr.*, 53, 127-132.

Cho M.J., Ha C.D. et Lemaux P.G., 2000. Production of transgenic tall fescue and red fescue plants by particle bombardment of mature seed-derived highly regenerative tissues. *Plant Cell Rep.*, 19 (11), 1084-1089.

- Christensen M.J., Simpson W.R. et Al Samarrai T.**, 2000. Infection of tall fescue and perennial ryegrass plants by combinations of different *Neotyphodium* endophytes. *Mycol. Res.*, 104 (8), 974-978.
- Émile J.-C., Ghesquière M., Traineau R., Jadas-Hécart J. et Mousset C.**, 1997. Évaluation de la valeur alimentaire de génotypes de fétuque élevée obtenus par différentes stratégies d'amélioration. *Fourrages*, 151, 373-387.
- Ghesquière M., Barre P., Marhadour S. et Kerlan M.C.**, 2000. Estimation of introgression rate of a fescue isozymic marker into tetraploid italian ryegrass at early generations of backcross. *Euphytica*, 114 (3), 223-231.
- Ghesquière M. et Mousset C.**, 2003. *Festulolium* : définitions et perspectives. *Fourrages*, 176, 479-492.
- Gillet M.**, 1980. La fétuque élevée et ses variantes. Dans : *Les graminées fourragères*. Éditions Gauthier-Villars, Paris, 268-274.
- Gillet M. et Jadas-Hécart J.**, 1965. La flexibilité des feuilles, critère de sélection de la fétuque élevée en tant que facteur d'appétibilité. *Fourrages*, 22, 6-11.
- GNIS**, 2000. *L'amélioration des plantes fourragères*. Collection « Agriculture et sélection végétale ». Cédérom, Édition GNIS, Paris.
- Ha S.B., Wu F.S. et Thorne T.K.**, 1992. Transgenic turf-type tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) plants regenerated from protoplasts. *Plant Cell Rep.*, 11 (12), 601-604.
- Hill N.S., Thompson F.N., Stuedemann J.A., Rottinghaus G.W., Ju H.J., Dawe D.L. et Hiatt E.E.**, 2001. Ergot alkaloid transport across ruminant gastric tissue. *J. Anim. Sci.*, 79 (2), 542-549.
- Huyghe C.**, 2002. 40 ans d'amélioration des espèces fourragères pérennes : acquis et perspectives. *Sél. Fr.*, 53, 41-54.
- Huyghe C.**, 2005. *Prairies et cultures fourragères en France : entre logiques de production et enjeux territoriaux*. INRA Éditions, Paris, 224 p.
- Jadas-Hécart J. et Gillet M.**, 1987. Prospection et évaluation de populations naturelles de fétuque élevée de l'ouest de la France. *Sél. Fr.*, 38, 21-27.
- Jadas-Hécart J. et Poisson C.**, 1992. La fétuque élevée. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannierot, éd., INRA Éditions, Paris, 299-309.
- Kuai B., Dalton S.J., Bettany A.J.E. et Morris P.**, 1999. Regeneration of fertile transgenic tall fescue plants with a stable highly expressed foreign gene. *Plant Cell, Tissue Organ Cult.*, 58 (2), 149-154.
- Prosperi J.-M., Guy P. et Balfourier F.**, 1995. *Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon*. INRA et BRG Éditions, Paris, 219 p.
- RAGT**, 1999. *Le mémento de l'herbe*. Document RAGT, Rodez, 53 p.

La féverole

Vicia faba L. ($2n = 2x = 12$)
(Fabacées ou Papilionacées)

Présentation de l'espèce

La forme ancestrale de *Vicia faba* L. est inconnue. Mis à part un site datant de 6800-6500 av. J.-C. près de Nazareth, il faut attendre le Néolithique tardif (III^e millénaire) pour trouver des restes sûrs de fèves en Europe et au Proche-Orient. L'espèce a subi au cours des siècles plusieurs migrations, ce qui a généré de nombreux centres de diversification. Une migration aurait eu lieu autour du Bassin méditerranéen et aurait été à l'origine de la culture du type à petite graine « féverole » au nord de l'Europe et du type à grosse graine « fève » dans le pourtour de la Méditerranée. Les types de fèves connus dans l'Antiquité étaient tous à petites graines, et il faut attendre la fin du I^{er} millénaire pour voir apparaître les types à grosses graines plates. Vers le XIII^e siècle, une migration du type fève aurait eu lieu en direction de l'Asie. Il a fallu attendre le XVI^e siècle pour que la fève soit introduite en Amérique du Sud et centrale. Dans l'Antiquité et au Moyen Âge, elle a été une des bases de l'alimentation humaine et des animaux d'élevage.

En 1862, environ 150 000 ha de féverole étaient cultivés en France. Cette culture a ensuite considérablement régressé, du fait de la disparition du cheval de trait et des élevages de pigeons, de son caractère de rendement instable et, à partir de 1945, de la forte concurrence du tourteau de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). En 1945, il n'y avait plus que 26 000 ha de féverole en France. Les progrès dans les méthodes de désherbage, la découverte d'insecticides efficaces contre les pucerons et l'accroissement des besoins en protéines, ont conduit à un certain renouveau d'intérêt, si bien qu'en 1955, la surface cultivée est remontée à 35 000 ha.

La sélection de la féverole n'a réellement débuté en France que dans les années 1970, suite à la crise du soja après l'embargo des États-Unis à l'encontre de la Communauté européenne. En 1986, les surfaces approchaient 60 000 ha en France (surtout avec des formes d'hiver). Elles ont ensuite diminué, pour

ré-augmenter fortement récemment (surtout avec des formes de printemps) en réponse à différents facteurs : le plan d'aide protéines, l'interdiction des farines de viande dans l'alimentation animale, la demande de l'agriculture et de l'élevage biologiques (demande d'aliments sans OGM), la montée du problème de maladie racinaire due à *Aphanomyces euteiches* sur le pois protéagineux et la demande du marché à l'exportation pour l'alimentation humaine. La féverole est sélectionnée en France comme une espèce annuelle allogame et entomophile. C'est une espèce multipliée par semences. Les principaux pollinisateurs sont l'abeille domestique et certaines espèces de bourdons. Si les distances d'isolement ne sont pas respectées, des fécondations croisées peuvent se produire et cela constitue une contrainte, notamment pendant la phase où des types variétaux présentant des compositions de graines particulières se développent. Par contre, il n'existe pas en France d'espèces sauvages avec lesquelles la féverole puisse s'hybrider.

La féverole est une légumineuse capable de fixer l'azote atmosphérique au niveau de ses racines. Cette voie d'acquisition de l'azote peut couvrir jusqu'à 80 % des besoins azotés de la plante. Les capacités de la féverole à fixer l'azote sont réputées parmi les plus élevées des légumineuses à graines. La bactérie *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* qui lui est associée, est spontanément présente dans les sols européens. Les besoins en fertilisation azotée des cultures de féverole sont donc voisins de zéro.

Cette espèce possède une assez grande variabilité morphologique (notamment pour la hauteur, la forme et la ramification de la plante et pour la couleur et la taille de la graine) et physiologique (réponse à la photopériode, longueur du cycle de reproduction, mode de reproduction [allogame ou autogame], ...). La FAO a recensé plus de 110 pays cultivant cette espèce.

La variabilité génétique est conservée au sein de collections de ressources génétiques. La France (INRA à Dijon, Côte-d'Or, et à Rennes, Ille-et-Vilaine) accueille une des collections les plus importantes au niveau mondial par son effectif, et surtout par la qualité de son maintien en isolement et la richesse de sa caractérisation. Ces deux collections seront regroupées en 2005 à l'INRA de Dijon. Cette réorganisation des collections s'accompagne de la signature d'une charte, sous l'égide du BRG, impliquant les sélectionneurs privés (GIE féverole), l'INRA et le GEVES. À l'étranger, des collections importantes de féverole sont conservées en Syrie (ICARDA), en Espagne (INIA à Cordoue), en Italie (à Bari), en Russie (VIR), en Chine (CAAS) et aux États-Unis (USDA à Pullman, Washington).

Production et utilisation

Le produit récolté peut être :

- la graine encore verte, dans le cas d'une consommation humaine à partir de gousses fraîches récoltées ;

- la graine sèche (graine exalbuminée contenue dans la gousse), lorsque la féverole est utilisée comme complément protéique pour l'alimentation animale ou en alimentation humaine ;
- la plante entière, lorsque celle-ci est utilisée comme fourrage.

En 2004, la production mondiale de féverole dépasse 4,4 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine (1,98 million de tonnes), l'Éthiopie (0,43 million de tonnes) et l'Égypte (0,4 million de tonnes). La France produit 0,36 million de tonnes (données FAO).

Selon V.S. Muratova, la féverole (*Vicia faba* L.) *sensu lato* possède deux sous-espèces : *V. faba* subsp. *paucijauga* (Alef.) Murat. à très petite graine (< 0,3 g/graine) et répartie en Inde et en Asie centrale, et *V. faba* subsp. *faba* (*eufaba* chez Muratova). La sous-espèce *faba* englobe trois variétés botaniques :

- *Vicia faba* subsp. *faba* var. *minor* Peterm. et *Vicia faba* subsp. *faba* var. *equina* Pers. Ces variétés botaniques possèdent une graine d'un calibre respectivement petit ou moyen (0,4 à 0,8 g/graine). La féverole, espèce protéagineuse, appartient aux groupes *minor* et *equina* qui sont surtout cultivés pour l'alimentation animale notamment en Europe occidentale et du Nord. Sa graine est principalement utilisée comme complément protéique. Elle est aussi utilisée en alimentation humaine (forte utilisation traditionnelle dans la cuisine égyptienne ou chinoise et incorporation de farine de fève dans la farine de boulangerie en France). La féverole peut parfois être utilisée comme fourrage (consommation en vert, ensilage ou déshydratée) ou comme engrais vert ;
- *Vicia faba* subsp. *faba* var. *faba* (synonyme : var. *major* Harz). Cette variété botanique se distingue par le calibre important de sa graine (0,9 à 2 g/graine) qui est destinée à l'alimentation humaine. Elle est dénommée « fève (potagère) ». Chez la fève potagère, la graine peut être consommée à l'état jeune (cru ou cuit) ou sec (légume sec). Sa zone de culture comprend le Bassin méditerranéen, l'Amérique du Sud et la Chine. La fève ne fait pas l'objet de programmes de recherche importants et ils ne seront pas décrits ici.

Histoire des variétés cultivées en France

On distingue deux types de féverole :

- la féverole de printemps, lorsqu'elle est semée à la sortie de l'hiver au nord et au centre de l'Europe ;
- la féverole d'hiver, lorsqu'elle est semée à l'automne dans le sud ou le centre de l'Europe. Beaucoup de ces types présentent une résistance au froid plus ou moins importante, et certaines variétés expriment un blocage du développement végétatif au cours de l'hiver, la plante restant alors au stade de rosette.

Variétés anciennes

Féverole de printemps

‘**de Picardie**’, ‘**de Lorraine**’ et ‘**de Champagne**’, exemples de variétés populations de pays cultivées depuis le XIX^e siècle.

Féverole d’hiver

‘**de Vendée**’, ‘**du Gers**’ et ‘**de Côte d’or**’, exemples de variétés populations de pays cultivées depuis le XIX^e siècle. ‘Côte d’Or’ est un géniteur de haute résistance au froid, réputé au niveau mondial.

Variétés récentes

Ce sont toutes des variétés synthétiques.

Féverole de printemps

1954, ‘**Ascott**’ (Blondeau, France), variété demi-courte et précoce ayant un rendement moyen.

1975, ‘**Diana**’ (Breustedt, Allemagne), variété se caractérisant par un très petit grain destiné à l’alimentation des oiseaux.

1982, ‘**Alfred**’ (Cebeco, Pays-Bas), variété demi-courte et précoce avec un bon rendement.

1985, ‘**Blandine**’ (INRA, France), première variété « zéro tannin ». Cette variété possède un rendement un peu faible.

1985, ‘**Cagnote**’ (Blondeau, France), variété se distinguant par sa grande productivité.

1993, ‘**Gloria**’ (Blondeau et GAE Recherche, France), variété « zéro tannin » avec un bon rendement.

1996, ‘**Divine**’ (INRA, France), variété à haut rendement se caractérisant par une réduction d’un facteur 10 des teneurs en facteurs anti-nutritionnels (vicine et convicine).

1996, ‘**Maya**’ (SERASEM, France), variété la plus cultivée actuellement, du fait de ses bonnes performances et de sa régularité en rendement.

1999, ‘**Mélodie**’ (INRA, France), variété se caractérisant par une faible teneur en vicine-convicine et un haut rendement.

2002, ‘**Victoria**’ (GAE Recherche, France), variété « zéro tannin », de rendement équivalent à celui des meilleures variétés.

2003, ‘**Disco**’ (INRA, France) première variété du type qualité « Fevita » (c’est-à-dire à faibles teneurs de la graine en tannins, en vicine et en convicine).

Féverole d’hiver

1977, ‘**Soravi**’ (INRA, France), variété résistante au froid, tardive.

1979, ‘**Talo**’ (CUSESA, Espagne), variété se caractérisant par une grande précocité. Cette variété est demi-courte. Sa sensibilité au froid lui vaut de n’être utilisable que dans le sud-ouest de la France.

1987, '**Castel**' (Tourneur Grandes Cultures, France), autre variété pour la zone Sud-Ouest se caractérisant par sa précocité et son caractère demi-court.

1988, '**Fabiola**' (INRA, France), variété très précoce et courte pour la zone Sud-Ouest. Elle se distingue par sa tolérance à l'antracnose.

1990, '**Karl**' (Blondeau, France), variété très résistante au froid et tardive qui peut ainsi être cultivée dans la zone Nord.

1991, '**Olan**' (Tourneur Grandes Cultures, France), variété tardive et productive.

2001, '**Irena**' (INRA, France), variété cumulant précocité, assez bonne résistance au froid, excellente productivité et forte tolérance à l'antracnose.

2001, '**Diva**' (INRA, France), variété semi-tardive, très tolérante au froid.

Remarque. La sélection, en réalisant des croisements entre différentes populations locales a introduit et valorisé une diversité génétique importante. L'exploitation de cette variabilité continue. Par exemple, actuellement un génotype extrait d'une population d'Équateur, 'BPL 938', est en cours d'exploitation dans les programmes de sélection, du fait de son excellent niveau de résistance aux différentes souches de *Botrytis fabae*. La caractérisation des collections de ressources génétiques a révélé des sources potentielles de résistance à l'antracnose, à la rouille, aux *Fusarium* spp., au nématode des tiges et au gel. De même, on connaît des génotypes possédant des gènes contrôlant l'architecture, la précocité, la réduction des teneurs en tannins, en vicine et en convicine dans la graine ou l'augmentation de la teneur en protéines. On connaît plusieurs stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques qui, bien qu'inutilisables actuellement, pourraient servir, après amélioration par la sélection, à la création de variétés hybrides F₁ ainsi que des stérilités nucléaires récessives ou dominantes pouvant faciliter le brassage de populations dans des schémas de sélection récurrente.

Regard sur 50 ans de sélection

La sélection de la féverole n'a que 30 ans, ce qui est très faible à l'échelle de la sélection, si on compare aux autres grandes espèces cultivées. Pendant cette période relativement courte, la qualité nutritionnelle et le rendement ont été considérablement améliorés. Cette amélioration explique en partie l'accroissement rapide et récent des surfaces cultivées (236 000 ha en 2000 et 395 000 ha en 2004 en Europe).

On dénombre aujourd'hui en Europe une dizaine d'entreprises de sélection qui travaillent cette espèce, avec des programmes de petite taille.

Caractères importants améliorés

Qualité nutritionnelle pour l'alimentation animale. Si les variétés actuelles contiennent 28 à 30 % de protéines par rapport à la teneur en matière sèche de la graine, la variabilité génétique disponible permet de viser comme objectif jusqu'à environ 32 % de protéines pour le type d'hiver, et 35 % pour le type de

printemps. Ces teneurs élevées sont intéressantes pour l'alimentation des volailles. Les protéines de la graine de féverole se distinguent par une forte teneur en lysine, ce qui rend cette plante intéressante comme complément des céréales. Néanmoins, comme toutes les graines de légumineuses, celles-ci sont déficitaires en acides aminés soufrés. Une limite dans l'utilisation de la graine de féverole vient aussi du fait qu'elle contient naturellement des substances réduisant la digestibilité ou les performances chez certains animaux d'élevage, telles que des tannins et des glucopyranosides (vicine et convicine). L'absorption de vicine et convicine par les volailles se traduit par une baisse sensible des performances, notamment du poids de l'œuf chez la pondeuse et de la croissance du poulet de chair. Les tannins quant à eux, ont pour effet de diminuer la digestibilité des protéines de la ration d'environ 10 % chez les volailles et chez le porc. Par contre, ces substances ne sont pas gênantes chez les animaux poly-gastriques, les tannins améliorant même l'utilisation protéique chez les ruminants. La découverte de deux gènes *zt1* et *zt2* (zéro tannin) supprimant les tannins et d'un gène *vc* réduisant les teneurs en glucopyranosides a été la première étape dans la réalisation de variétés qui ont, depuis, prouvé leur bonne valeur nutritionnelle chez le porc et les volailles.

Qualité nutritionnelle pour l'alimentation humaine. Des variétés à faible teneur en glucopyranosides pourraient être mieux valorisées en alimentation humaine, car elles seraient susceptibles réduire les risques de favisme (la vicine et la convicine sont les produits réputés responsables de cette maladie chez quelques populations humaines présentant un gène de sensibilité). Chez les individus présentant certaines mutations rares de la glucose 6 phosphate déshydrogénase, une hémolyse se manifeste, après ingestion de fèves, par une anémie, une jaunisse et une hémoglobinurie. Il reste à démontrer que les variétés à teneur réduite en vicine et en convicine disponibles actuellement, sont effectivement sans effet négatif sur les individus sensibles au favisme (action de recherche européenne « Eufaba » en cours sur ce thème).

Rendement. Le rendement des variétés de féverole de printemps a presque doublé en 20 ans : il est passé de 25-30 q/ha en 1980 à 50-55 q/ha actuellement. Les variétés de féverole d'hiver ou de printemps conduites de façon optimale peuvent fournir un rendement atteignant 60-70 q/ha.

Raccourcissement de la tige. Le raccourcissement de la tige a permis de limiter les problèmes de verse et de faciliter la récolte. Cela a joué un rôle non négligeable dans la stabilisation des performances agronomiques.

Précocité et création du type variété d'hiver pour le sud-ouest de la France. L'introduction du caractère de précocité a permis de réaliser les premières variétés de féverole d'hiver adaptées aux zones méridionales. Ces variétés sont intéressantes du fait de leur cycle décalé de plus d'un mois, leur permettant d'éviter les sécheresses estivales. Ces variétés ont un rendement beaucoup plus stable que celui des autres types de féverole. De plus, elles sont économes en eau.

Résistance au froid et création du type variété tardive d'hiver. L'introduction de la résistance au froid dans la féverole est à l'origine de la création de variétés tardives de féverole d'hiver. Ce sont des plantes qui manifestent un arrêt de croissance pendant l'hiver (mise en rosette). Celui-ci contribue à des mécanismes d'échappement au gel, auxquels se combine une résistance intrinsèque au froid. Il existe une corrélation négative entre la précocité et la résistance au froid, ce qui explique qu'il n'existe pas encore de variété précoce et très résistante au froid. Les variétés tardives d'hiver sont intéressantes du fait de l'allongement de la durée de leur cycle qui contribue à leur bon rendement (environ 10 q/ha de plus que les variétés de printemps en zone Ouest, mais leur tardiveté doit être modérée pour éviter des difficultés de récolte).

Sensibilité à la sécheresse. La féverole est sensible à la sécheresse et demande une bonne alimentation en eau, notamment au moment de la floraison et de la nouaison. La création de variétés d'hiver à floraison précoce, qui fleurissent plus précocement que les types de printemps, permet d'échapper aux stress de sécheresse et de chaleur de juin et de diminuer les besoins d'irrigation.

Résistance aux maladies. Des progrès significatifs (à la fois introduction de gènes de résistance et méthodes de criblage) ont été obtenus dans la résistance à la maladie des taches noires ou anthracnose causée par *Ascochyta fabae*. Cette maladie provoque l'apparition de taches noires sur le feuillage et les gousses, entraînant des dommages aux grains et une baisse considérable du rendement. Une variété résistante à cette maladie, 'Irena' (INRA, 2002), est aujourd'hui cultivée.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation de mutations spontanées	OUI <i>zt1</i> et <i>zt2</i> , mutations spontanées responsables du caractère « zéro tannin » ('Blandine', 'Gloria', 'Tyrol', 'Disco'). <i>vc</i> , mutation spontanée responsable d'une diminution d'un facteur 10 du taux de vicine-convicine ('Divine', 'Mélodie', 'Disco', ...).
Mutagenèse induite	ESSAIS en France Une stérilité mâle nucléaire dominante a été obtenue par mutagenèse. Elle est utilisée pour le brassage de populations. OUI à l'étranger L'IAEA et la FAO ont recensé 13 variétés de <i>Vicia faba</i> obtenues par mutagenèse induite. La majorité de ces variétés a été obtenue par des équipes russes et polonaises. Cette méthode a permis l'obtention de variétés ayant, par exemple, un meilleur rendement ('Bronto', en 1989), une meilleure précocité ('Martin', en 1994), des tiges plus courtes ('Dino', en 1987), des résistances aux maladies ('Kyu-82', en 1987) ainsi qu'une augmentation de la teneur en protéines ('Severinovskie 1', en 1992).

suite...

... suite

Croisements interspécifiques	ESSAIS Des essais ont été réalisés entre <i>Vicia faba</i> et <i>V. narbonensis</i> L. et <i>V. hyaeniscyamus</i> Mouterde mais sans succès.
Hybridation somatique	AUCUNE La féverole est particulièrement récalcitrante à cette méthode.
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	ESSAIS La féverole est une espèce particulièrement récalcitrante aux techniques de régénération et de transformation, comme les légumineuses à grosses graines en général. Aucun résultat de transgénèse n'est connu.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	AUCUNE Cette espèce est particulièrement récalcitrante.
Recours à la stérilité mâle	ESSAIS Plusieurs cytoplasmes inducteurs de stérilité mâle ont été étudiés, mais des problèmes d'instabilité phénotypique de la stérilité n'ont pas permis d'inscrire une variété hybride.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE Il existe des problèmes d'incompatibilité entre sous-espèces.
Marquage moléculaire	AUCUNE Cependant, la recherche de marqueurs moléculaires est engagée dans le cadre du projet européen « Eufaba » 2003-2005.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale pour générer des variétés populations. Sélection récurrente à cycles courts pour améliorer les composantes du rendement. Rétrocroisements pour l'introduction de gènes de résistance et d'absence de tannin et de vicine-convicine. Sélection généalogique et choix des constituants pour générer des variétés synthétiques.
Types variétaux	Variété population. Les anciennes variétés de pays ('Côte d'or') et certaines variétés actuelles sont de ce type. Variété synthétique. C'est le cas de la majorité des variétés cultivées en France. ESSAIS Variété hybride. Il existe une hétérosis importante dans cette espèce. Celle-ci n'est, jusqu'à présent, que partiellement exploitée dans les variétés synthétiques, du fait de l'absence de système permettant de contrôler efficacement la fécondation croisée. Variété lignée pure. Ce type variétal est très répandu en Afrique du Nord. En France, les lignées pures ont un rendement nettement moins stable que les variétés synthétiques et ne sont donc pas utilisées malgré leurs bonnes performances.

Perspectives d'amélioration

Au cours des 40 dernières années, beaucoup d'efforts et de progrès ont porté sur les variétés de féverole de printemps. L'intérêt d'une féverole d'hiver comme source de diversification (donc de sécurité agronomique et écologique), parmi les protéagineux et les cultures d'hiver, correspond à un nouvel objectif ambitieux, qui permettrait d'aborder des zones géographiques plus larges et des potentiels de rendement plus élevés.

En préalable à cette action, il sera utile d'acquérir des références, d'une part sur les impacts environnementaux de la féverole d'hiver dans les systèmes de culture (notamment pour l'eau et l'azote), d'autre part sur le coût et la faisabilité d'itinéraires techniques à faibles intrants pour cette culture. En parallèle, il est important de mettre en place une vigilance par rapport au risque d'attaque par *Aphanomyces euteiches* qui pourrait apparaître si, comme dans le cas du pois de printemps, la culture se développait avec des retours fréquents dans les assolements.

Pour la partie génétique, il semble que la question de recherche majeure sur féverole d'hiver soit celle des gènes de l'échappement et de la résistance au froid intrinsèque. Même si la situation paraît similaire à celle du pois (de très bons niveaux de résistance à des froids de -20°C sont déjà connus dans les vieilles populations de Côte d'Or et du Bas-Jura, et de bons niveaux de tolérance ont déjà été incorporés dans des populations de Bretagne et de Grande-Bretagne), il reste encore à améliorer le niveau du rendement et la précocité. L'amélioration de la tolérance à l'hiver pourra notamment bénéficier des avancées actuelles en génomique du pois et de *Medicago truncatula* Geartn., espèce modèle pour les légumineuses (travaux dans le programme européen FP6 *Grain Legumes* 2004-2008), en s'appuyant sur les fortes homologies de séquence et la conservation de synténie de la féverole, avec ces deux espèces.

Sachant que sur les caractères de résistance aux maladies et de qualité, des géniteurs ont été utilisés et des méthodes de criblage développées, il se pose maintenant la question d'une validation et d'une intégration de ces caractères par la sélection. L'objectif à atteindre est une féverole d'hiver de qualité de type *Fevita* (c'est-à-dire à faibles teneurs en tannins et vicine-convicine), précoce et résistante au froid pour le centre et l'est de la France. Le réalisme de cet objectif résulte du fait que les géniteurs de qualité *Fevita*, de résistance au froid et aux maladies majeures sont déjà disponibles chez la féverole. Le réseau de sélectionneurs et d'essais pour créer et évaluer ce matériel existe actuellement en Europe. Des marqueurs moléculaires sont en outre en cours de développement dans le cadre du projet européen FP5 *Eufaba* 2003-2006, dans le but d'aider une telle action de sélection multi-caractères.

Caractères à améliorer

Résistance au froid. Des progrès significatifs peuvent certainement encore être obtenus par la sélection, notamment pour rompre le lien de ce caractère avec la tardiveté.

Résistance aux maladies. De nombreuses maladies fongiques causent encore des dégâts à la féverole. Parmi elles, on peut citer :

Rouille (*Uromyces fabae*). Cette maladie apparaît à la fin juin et peut être très grave sur féverole de printemps. Des gènes de résistance sont disponibles.

Anthraxnose (*Ascochyta fabae*). Cette maladie cause des dégâts dans les cultures d'hiver, mais des géniteurs de résistance et des techniques de criblage sont déjà disponibles.

Maladie des taches brunes (*Botrytis fabae*). Cette maladie, que l'on rencontre fréquemment sur féverole d'hiver, se manifeste par des taches brunes sur le feuillage au printemps. Si les conditions sont favorables à l'agent pathogène, la maladie peut ensuite s'étendre à la fleur et à la jeune gousse, ce qui entraîne une coulure, affectant de manière drastique le rendement. Un géniteur de résistance est disponible, de même que les méthodologies de criblage du matériel.

Fusariose (*Fusarium spp.*). Les *Fusarium* peuvent causer de fortes chutes de rendement consécutives à des nécroses racinaires, souvent plus sérieuses sur les variétés de type de printemps « zéro tannin ». Des sources de résistance sont connues. Ce thème fait partie du programme de recherche européen *Eufaba* en cours actuellement.

Méthodes à développer

Le marquage moléculaire, pour appuyer la sélection de caractères comme « zéro tannin », teneur faible en vicine-convicine, résistance aux stress abiotiques, au *Botrytis fabae* ou à l'anthraxnose, est en cours dans le cadre du programme européen *Eufaba* 2003-2006.

Inscription et protection des variétés en France

1961, description, par arrêté ministériel, des conditions d'inscription des variétés de plantes fourragères et protéagineuses.

1974, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste provisoire de variétés de féverole admises à la certification.

En 2003, 21 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français sur la liste A (aucune sur la liste B), 140 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Dans les épreuves réalisées par le GEVES, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs

de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de cette période, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par les 3 variétés les plus cultivées. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le CTPS a contribué à orienter la sélection de la féverole vers la création de variétés « zéro tannin » à petite graine riche en protéines, grâce à un système de bonification.

Pour en savoir plus

Aprifel, 1999. La fève. Dans : *Fiches nutritionnelles de référence*, 2 p.

Bond D.A. et Duc G., 1994. Plant breeding as a means for reducing anti-nutritional factors in grain legumes. Dans : *Recent advances of research in antinutritional factors in legume seeds*. AFB Van der Poel, J. Huisman et H.S. Saini, éd., *EAAP*, 70, 379-396.

Bottinger P., Steinmetz A., Schieder O. et Pickardt T., 2001. *Agrobacterium*-mediated transformation of *Vicia faba*. *Mol. Breed.*, 8 (3), 243-254.

Carre S., Tasei J.N., Le Guen J., Mesquida J. et Morin G., 1993. The genetic control of seven isozymic loci in *Vicia faba* L. Identification of lines and estimates of outcrossing rates between plants pollinated by bumble bees. *Ann. Appl. Biol.*, 122 (3), 555-568.

Carre S., Badenhassner I., Tasei J.N., Le Guen J. et Mesquida J., 1994. Pollen deposition by *Bombus terrestris* L., between male-fertile and male sterile plants in *Vicia faba* L. *Apidologie*, 25, 338-349.

Chaux C. et Foury C., 1994. La fève. Dans : *Productions légumières*, Tec & Doc, Paris, tome III, 3-15.

Cubero J.I., 1974. On the evolution of *Vicia faba* L. *Theor. Appl. Genet.*, 45, 47-51.

Duc G., 1984. La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique 447 chez la féverole (*Vicia faba* L.). I. Étude du déterminisme maternel de l'instabilité phénotypique de la stérilité mâle. *Agron. Sci. Prod. Veg. Environ.*, 2 (7), 619-627.

Duc G., 1997. Faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Res.*, 53 (1/3), 99-109.

Duc G., Brun N., Merghem R. et Jay M., 1995. Genetic variation in tannin-related characters of faba bean seeds (*Vicia faba* L.) and their relationship to seed-coat colour. *Plant Breed.*, 114 (32), 272-274.

- Duc G., Crépon K., Marget P. et Muel F.**, 2004. Fevita : a new type of faba bean cultivars. http://www.grainlegumes.com/default.asp?id_biblio=349&rub=expertzone
- Duc G., Le Guen J., Picard J. et Berthelem P.**, 1985. Proposed use for newly-discovered dominant male sterile allele for breeding purposes in *Vicia faba*. *FABIS Newsl. Faba Bean Inf. Serv.*, 12, 8-10.
- Duc G., Marget P., Esnault R., Le Guen J. et Bastianelli D.**, 1999. Genetic variability for feeding value of faba bean seeds (*Vicia faba*) : comparative chemical composition of isogenics involving zero-tannin and zero-vicine genes. *J. Agric. Sci.*, 133 (2), 185-196.
- Grosjean F., Cerneau P., Bourdillon A., Bastianelli D., Peyronnet C. et Duc G.**, 2001. Valeur alimentaire comparée pour le porc de féveroles presque isogéniques contenant ou non des tannins ou faible teneur en vicine et convicine. *Journ. Rech. Porc.*, 33, 205-210.
- Le Guen J.**, 1983. Incompatibilité unilatérale chez *Vicia faba* L. I. Analyse globale de croisements intra-spécifiques entre 4 sous-espèces. *Agronomie*, 3 (5), 443-449.
- Le Guen J. et Berthelem P.**, 1983. Instabilité phénotypique de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique chez *Vicia faba*. I. Hétérogénéité inter- et intra-plantes. *Agronomie*, 3 (3), 265-272.
- Le Guen J. et Duc G.**, 1992. La féverole. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 187-203.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel et Lafon R.**, 1991. Maladies du pois et de la fève. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 291-305.
- Métayer J.-P., Barrier-Guillot B., Skiba F., Crepon K., Bouvarel I., Marget P., Duc G. et Lessire M.**, 2003. Valeur alimentaire et utilisation de différents types de féveroles chez le poulet et le coq adulte. *5^{es} Journ. Rech. Avic.*, Tours, mars 2003, 133-135.
- Moule C.**, 1973. Fèves et féveroles. Dans : *Plantes sarclées et diverses*. La Maison rustique, Paris, 3-14.
- Muratova V.S.**, 1931. Common bean (*Vicia faba* L.). *Bull. Appl. Bot. Genet. Plant Breed.*, Leningrad, supplement 50.
- Péron J.-Y.**, 1999. La fève. Dans : *Productions légumières. Références*. Éditions Synthèse Agricole, Bordeaux, 326-329.
- Picard J., Duc G. et Pelletier R.**, 1985. « Côte d'Or », a highly frost resistant population of *Vicia faba*. *FABIS Newsl. Faba Bean Inf. Serv.*, 13, 11-12.
- Pierre J., Le Guen J., Pham Delegue M.-H., Mesquida J., Marilleau R. et Morin G.**, 1996. Comparative study of nectar secretion and attractivity to bees of two lines of spring – type faba bean. *Apidologie*, 27, 65-75.
- Tivoli B., Le Guen J., Berthelem P. et Onfroy C.**, 1986. Comparison of some methods of evaluation of reaction of different winter faba bean genotypes to *Botrytis fabae*. *FABIS Newsl.*, 16, 46-50.
- Zohary D. et Hopf M.**, 2000. *Domestication of plants in the Old World. The origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe and the Nile Valley*. Oxford Univ. Press., Oxford, 316 p.

Le forsythia

Forsythia spp. Vahl ($2n = 2x = 28$)
(Oléacées)

Présentation du genre

Le genre *Forsythia* comprend plusieurs espèces originaires d'Asie (*F. viridissima* Lindl., *F. suspensa* Vahl, *F. ovata* Nakai) ou du sud de l'Europe (*F. europaea* Degen et Baldacci). Il a été introduit en Europe en 1833 par un Néerlandais en poste à la cour de l'empereur du Japon. Il doit son nom au botaniste anglais W. Forsyth (1737-1804), l'un des fondateurs de la *Royal Horticultural Society* et jardinier en chef au jardin royal de Kensington, qui cultiva beaucoup de plantes nouvellement découvertes. Cette plante était déjà assez répandue en Europe dès 1850. 1878 est la date où le premier croisement interspécifique a été remarqué dans un jardin botanique. Entre 1900 et 1940, la qualité ornementale de cette plante a été améliorée par les horticulteurs, et des mutants spontanés ont été sélectionnés entre 1930 et 1940.

Les différentes espèces du genre *Forsythia* sont pérennes, auto-stériles et multipliées végétativement par boutures. Le genre *Forsythia* est exotique. Il n'existe pas de genres génétiquement proches en France susceptibles de s'hybrider spontanément avec lui. Il est classé par les botanistes dans la famille des Oléacées, à côté du frêne (*Fraxinus elatior* L.), de l'olivier (*Olea europaea* L.), du jasmin (*Jasminum* sp. L.), du lilas (*Syringa vulgaris* L.), du troène (*Ligustrum vulgare* L.) et de quelques autres genres moins connus.

Les botanistes ont identifié 7 espèces et la sélection a produit une centaine de variétés. Le genre a une variabilité génétique relativement réduite et les principaux caractères distinctifs des différents clones sont le niveau de ploïdie (di-, tri- ou tétraploïde), le port érigé ou souple, la taille (de 30 cm à 3-4 mètres), la taille de la fleur (1 à 5 cm de diamètre), l'intensité de la couleur de fleur, l'hétérostylie, la présence ou l'absence d'une moelle cloisonnée ainsi qu'un certain nombre de caractères biochimiques des dérivés des constituants polyphénoliques.

Production et utilisation

Le forsythia est un arbuste ornemental dont la couleur jaune des fleurs et la floribondité sont très appréciées au début du printemps.

Il est utilisé comme arbuste d'ornement dans les jardins particuliers et les espaces verts en plantes isolées, en touffe ou en haie. Il est, en général, commercialisé au stade final de production en conteneurs de différentes capacités, sous forme de plante entière. Aucune donnée ne permet de quantifier la production nationale, mais on peut l'évaluer à quelques centaines de milliers d'exemplaires par an.

Récemment, de nouveaux types plus nains ont été diffusés pour une utilisation en rocailles, sur balcon ou en couvre-sol.

Il est également utilisé en fleurs coupées : les rameaux prélevés en hiver fleurissent en vase à l'intérieur. Pour cet usage, les variétés de *Forsythia* × *intermedia* Zab. sont le plus fréquemment employées. Par ailleurs, le forsythia est une plante traditionnelle de la pharmacopée asiatique. Les fruits (capsules), réduits en poudre, ont des propriétés anti-inflammatoires et anti-tumorales (grâce à la présence de dérivés des polyphénols et de la rutine en particulier).

Histoire des variétés cultivées en France

Vers 1880, *F.* × *intermedia* Zab., hybride interspécifique entre *F. suspensa* et *F. viridissima* obtenu par Zabel, directeur du jardin botanique de Göttingen (Allemagne). Cet hybride supposé est à l'origine de nombreuses variétés cultivées.

1900, *F.* × *intermedia* var. *vitellina* Koehne, première variété obtenue dans l'hybride *F.* × *intermedia*, multipliée par bouturage. Elle est vigoureuse et ses fleurs sont jaune d'or foncé.

1935, '**Lynwood**' (États-Unis), mutant spontané de la variété botanique *F.* × *intermedia* var. *spectabilis* Koehne se caractérisant par une grande floribondité.

1939, '**Arnold Giant**' (Arnold Arboretum, Boston, États-Unis), première variété tétraploïde, parmi une gamme développée aux États-Unis. Elle a été obtenue par K. Sax à la suite d'un traitement à la colchicine de *F.* × *intermedia*.

1942, '**Spring Glory**' (États-Unis), mutant spontané se caractérisant par une grande floribondité et une relative précocité de floraison.

1960-70, plusieurs variétés polonaises et canadiennes résistantes au froid souvent issues de *F. ovata* ont été obtenues. Ce caractère a été introduit par croisements interspécifiques.

1985, '**Courtalyn**' (INRA, France), variété obtenue par mutagenèse provoquée, se caractérisant par des entre-nœuds plus courts et des ramifications plus nombreuses que la variété d'origine 'Lynwood'. Cette variété est commercialisée sous la marque Week end®.

1985, '**Courtasol**' (INRA, France), variété compacte à port étalé, utilisée en plante couvre-sol pour les espaces verts. C'est la première fois qu'on dispose d'une plante couvre-sol très florifère. Cette variété connaît un vif succès aux États-Unis où elle est produite sous licence. Elle est commercialisée sous la marque Marée d'or®. Elle résulte de la sélection, dans un semis, d'un mutant auto-fertile obtenu par irradiation aux rayons γ . Cette variété est la première d'un ensemble de variétés compactes apparentées. Les autres sont '**Courtacourt**', '**Courtaneur**' et '**Courdijau**' (INRA, France). Ces variétés sont protégées par COV et commercialisées sous les marques Boucle d'or®, Mélée d'or® et Golden peep® respectivement.

Remarque. S'agissant d'un genre exotique, la sélection, au niveau européen, a augmenté la variabilité ou a permis son expression : des semis, la réalisation de traitements mutagènes, des croisements interspécifiques ou entre génotypes d'origines géographiques différentes y ont contribué.

Regard sur 50 ans de sélection

En 150 ans, sur une espèce pourtant d'importance économique mineure, on a assisté à l'emploi de méthodes et techniques très diverses. La création variétale s'est faite par la sélection dans des semis de hasard, puis par l'emploi de la mutagenèse (avec ou sans recours à la culture *in vitro*) et maintenant par la transgénèse. L'activité de sélection est arrêtée dans le monde.

Il existe, au Japon, une activité de recherche importante dans le domaine de la biochimie pour l'identification des molécules actives dans les extraits de forsythia utilisés en pharmacopée traditionnelle.

Caractères importants améliorés

Diversification. Un nouveau type de plante couvre-sol, très florifère a pu être produit.

Floribondité. L'amélioration de cette espèce a permis d'obtenir des plantes très florifères et des fleurs plus grosses que celles des espèces sauvages.

Résistance au froid. La résistance au froid a été introduite par hybridation interspécifique à partir de *F. ovata* et *F. mandshurica* Uyeki par les Canadiens et les Polonais dans les années 1960-1970. Les variétés actuellement cultivées en France possèdent également des caractères de rusticité et supportent des températures de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI Deux variétés datant de la première moitié du XX ^e siècle sont identifiées comme mutants spontanés et caractérisés par une floraison plus abondante ('Lynwood' et 'Spring Glory').
Mutagenèse induite	OUI Plusieurs caractères ont été obtenus par traitements aux rayons γ : – des entre-nœuds plus courts et des ramifications plus nombreuses ('Courtalyn') ; – le port de la plante : couvre-sol ('Courtasol') ou compact.
Croisements interspécifiques	OUI Un certain nombre de croisements interspécifiques ont été réalisés au sein du genre <i>Forsythia</i> . Cette méthode a, notamment, permis l'introduction d'une plus grande résistance au froid ('Maluch', 'Kanarek').
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Des clones tétraploïdes ont été obtenus par traitement à la colchicine. En absence de sélection ultérieure dans leur descendance, ce matériel ne présente aucun intérêt (gros bois, floraison réduite,...). Des programmes menés aux États-Unis, dans les années 1930, ont abouti à des variétés encore commercialisées aujourd'hui ('Karl Sax', 'Beatrix Farrand') ainsi qu'à des sélections plus récentes ('Parkdekor'). La polyploïdie et la sélection ont augmenté la taille de la fleur et l'intensité de la couleur vers le jaune d'or.
Transgénèse	ESSAIS Il existe des plantes transgéniques portant à la fois un transgène de dihydro-flavonol réductase et un transgène d'anthocyanine synthase, produisant des anthocyanes dans l'épiderme des pétales.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplification végétative	OUI Le forsythia est multiplié végétativement par bouturage horticole. La culture <i>in vitro</i> est utilisée pour favoriser le développement des bourgeons adventifs après mutagenèse artificielle ou dans les programmes de transgénèse.
Sélection sanitaire	OUI La culture de méristèmes <i>in vitro</i> a permis d'assainir des variétés anciennes. Un matériel sain a pu être proposé en attendant l'arrivée de nouvelles variétés. Les plantes assainies ne présentaient pas d'avantage particulier. La mise en place d'un schéma de certification sanitaire n'est donc pas justifiée.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE

suite...

... suite

Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Le genre <i>Forsythia</i> est autostérile avec un dimorphisme floral (longistylé / brévistylé). L'autofécondation est impossible, les croisements sont seuls possibles entre clones dissemblables pour la morphologie florale.
Marquage moléculaire	AUCUNE sauf pour des études de phylogénie (une seule publication coréenne).
MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Deux schémas principaux : – sélection après hybridation contrôlée (ou non) ; – sélection après mutagenèse et stabilisation des mutants.
Types variétaux	Variété clone

Perspectives d'amélioration

Aucun programme de sélection variétale n'est actuellement conduit dans le monde. Il reste cependant des caractères à améliorer.

Diversification de la couleur de la fleur. La plus grande faiblesse de cette plante comme plante ornementale est l'absence de variabilité de la couleur de la fleur. À ce jour, la mutagenèse et l'hybridation se sont révélées incapables de produire le moindre changement : la transformation génétique semble être la seule possibilité.

Protection des variétés en France

Il n'existe pas de catalogue officiel pour les espèces ornementales. Quelques variétés sont protégées par COV et marques déposées ou équivalent dans le monde.

La collection de référence pour les examens techniques nécessaires à la délivrance de COV pour l'Union européenne, vient d'être transférée de l'INRA au GEVES à Brion (Maine-et-Loire). Elle comporte 130 clones, ce qui en fait la collection la plus riche du monde.

Pour en savoir plus

Belot A., 1992. Forsythia. Dans : *Le Bon Jardinier*, Éditions La Maison rustique, Paris, 153^e édition, tome 2, 1787-1788.

Cadic A., 2001. Improvement of ornamental plants. Breeding ornamentals in the future goals, genes, tools. *Acta Hortic.*, 508, 356 p.

Cadic A., 2005. Domestication et amélioration pour un élargissement de la gamme des espèces ligneuses d'ornement. *Sél. Fr.*, 55, 13-22.

Rosati C., Cadic A., Renou J.-P. et Duron M., 1996. Regeneration and *Agrobacterium*-mediated transformation of *Forsythia* × *intermedia* « Spring Glory ». *Plant Cell Rep.*, 16, 114-117.

Rosati C., Cadic A., Duron M., Renou J.-P. et Simoneau P., 1997. Molecular cloning and expression analysis of dihydroflavonol 4-reductase gene in flower organs of *Forsythia* $\times$ *intermedia*. *Plant Mol. Biol.*, 35, 303-311.

Rosati C., Duron M., Cadic A. et Simoneau P., 2000. Towards novel flower colors in *Forsythia* by genetic engineering. *Acta Hortic.*, 508, 45-48.

Rosati C., Cadic A., Duron M., Ingouff M. et Simoneau P., 2000. Molecular characterization of the anthocyanidin synthase gene in *Forsythia* $\times$ *intermedia* reveals organ-specific expression during flower development. *Plant Sci.*, 149, 73-79.

Le fraisier

Fragaria × *ananassa* Duch. ($2n = 8x = 56$)
(Rosacées)

Présentation de l'espèce

Le fraisier des bois (*Fragaria vesca* L.), espèce croissant dans les sous-bois en Europe a fait l'objet de cueillette depuis la Préhistoire, mais elle est peu répandue en climat méditerranéen et était peu connue des Grecs et des Romains. La véritable culture du fraisier des bois (*Fragaria vesca*) en France n'a commencé qu'au XIV^e siècle. Au Moyen Âge, des propriétés médicinales étaient attribuées au fraisier et à son fruit. Au XVI^e siècle, c'est une autre espèce de fraisier, indigène dans certaines régions de l'Europe, *Fragaria moschata* Weston, connue sous le nom de fraisier hautbois ou Capron, qui va remplacer le fraisier des bois, notamment en Belgique et en Allemagne, puis plus tard en France (variétés 'Capron royal' et 'Belle Bordelaise') et en Italie (variété 'Profumata di Tortona'). À la fin du XVI^e siècle, Jacques Cartier rapporta du Canada des plants de fraisier de Virginie (*Fragaria virginiana* Mill.) se caractérisant par un fruit plus ferme et rouge écarlate qui va être cultivé en Europe jusqu'à la fin du XIX^e siècle. En 1714, l'ingénieur maritime français A. F. Frézier rapporte d'Amérique du Sud (Chili) des plants de *Fragaria chiloensis* (L.) Mill., déjà cultivés par les Indiens. Ces plants se révéleront mâles stériles. La pollinisation fortuite vers 1740 en Bretagne de ce fraisier du Chili à gros fruit blanc (*Fragaria chiloensis*) avec le pollen d'un *Fragaria virginiana* permit la production de fraises. Les semis résultant des graines de ces premières fraises hybrides sont à l'origine de la naissance du fraisier cultivé moderne « à gros fruit » (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). C'est le botaniste A. N. Duchesne qui démontra expérimentalement en 1766 l'origine interspécifique du fraisier cultivé à gros fruit. D'autres hybridations du même type ont eu lieu, à peu près à la même époque, en Angleterre et aux Pays-Bas. De nombreux horticulteurs privés, amateurs et professionnels, en Europe, puis en Amérique du Nord, se sont intéressés à la sélection de nouvelles variétés à partir de semis. Ils obtinrent des variétés de qualité, facilement diffusées grâce à la multiplication végétative par stolons, mais rapidement « dégénérées » sous l'effet des contaminations virales. Ainsi, le

fraisier à gros fruit est une espèce très récente dont l'histoire n'a commencé qu'au XVIII^e siècle.

Le fraisier cultivé, *Fragaria* × *ananassa*, est octoploïde ($2n = 8x = 56$) comme les deux espèces dont il est issu (*F. virginiana* et *F. chiloensis*) alors que le fraisier de nos sous-bois (*F. vesca*) est diploïde ($2n = 2x = 14$). Le fraisier cultivé est essentiellement allogame et tolère très mal l'homozygotie. C'est une espèce pérenne multipliée végétativement par des stolons (tiges aériennes rampantes) qui produisent de nouvelles plantes à leurs extrémités.

Les possibilités de croisements entre *F. vesca* et *F. × ananassa* sont très limitées compte tenu des niveaux différents de polyploïdie. *F. moschata*, hexaploïde ($2n = 6x = 42$), est assez rare à l'état sauvage, paraît souvent sub-spontanée et la faisabilité du croisement avec *F. × ananassa* est très discutée.

Par contre, le fraisier à gros fruit, *F. × ananassa*, issu de l'hybridation entre deux espèces *F. virginiana* et *F. chiloensis*, se croise facilement avec ces deux espèces très diversifiées, présentes sur de grandes parties du continent américain et constituant un important réservoir de variabilité. Ces espèces n'étant pas présentes en Europe, c'est l'introduction en France de clones américains (cultivés ou sauvages) qui a permis d'augmenter la variabilité. Plusieurs collections existent dans le monde. Les États-Unis disposent du plus grand conservatoire d'espèces de *Fragaria* dont le fraisier cultivé. En Europe, des mesures de conservation des ressources génétiques (principalement *F. × ananassa*) ont été prises de manière volontaire par 12 instituts conservant plus de 900 variétés dont 112 constituent la *core collection*. Ces ressources sont conservées en doublons, en conditions horticoles et *in vitro*. En France, le Centre interrégional de recherche et d'expérimentation de la fraise (CIREF) conserve à Lanxade (Dordogne), à l'abri des insectes, une collection qui regroupe 150 variétés octoploïdes et une collection d'espèces sauvages représentant la diversité génétique du fraisier tandis que le Ctifl entretient une collection *in vitro* à Bellegarde (Gard). Le GEVES héberge, à Brion (Maine-et-Loire), sous tunnel à l'abri des insectes pour éviter les contaminations virales, un nombre important de variétés anciennes présentant un intérêt scientifique (résistance aux maladies : 'Surprise des Halles', 'Sengana'...) ou un intérêt historique ('Vicomtesse Héricart de Thury', 'Madame Moutot' ...).

Production et utilisation

Le produit récolté, la fraise, est un faux fruit qui provient de la différenciation du réceptacle floral, induite par les ovules fécondés. Chaque ovule est contenu dans un fruit sec indéhiscent ou akène. Ces akènes, disposés dans des alvéoles à la surface du réceptacle et perçus comme des « graines », sont donc les vrais fruits. La partie comestible est constituée par le réceptacle hypertrophié et charnu.

Les très nombreuses variétés cultivées diffèrent beaucoup par la précocité et par la couleur, la forme et la saveur de la fraise. Leur multiplicité est due aussi au double usage : variétés pour jardiniers amateurs et variétés pour professionnels.

Les variétés sont classées en trois groupes selon leur sensibilité à la photopériode :
 – variétés non remontantes, également appelées variétés de jours courts, dont l'induction florale a lieu à partir de début septembre (photopériode ou durée du jour critique de ± 13 heures). La plante fleurit au printemps et donne une seule production groupée par an. On distingue les variétés précoces, les variétés de saison et les variétés tardives. Chez certaines variétés de jours courts, l'inhibition printanière de l'induction florale due au froid hivernal cesse, alors que la durée de jour est encore inférieure à la valeur critique pour la variété considérée. Il y a alors induction florale de bourgeons et une deuxième période de production succède à la récolte correspondant à l'induction florale d'automne. C'est ce que l'on appelle la remontée de juin ;

– variétés partiellement remontantes (ou semi-remontantes), dont l'induction florale a lieu début août (durée du jour de ± 14 heures 30). L'induction à cette période de l'année permettra une floraison et une production d'automne qui sera suivie par la production de printemps qui a été induite à l'automne (à ne pas confondre avec la remontée de juin) ;

– variétés remontantes (ou à production continue, appelées *day neutral* aux États-Unis), dont l'induction florale est indifférente à la durée du jour. Elle a lieu de façon ininterrompue, du printemps à l'automne, tant que les conditions climatiques sont favorables. La production a lieu de façon continue en été et à l'automne de l'année même et au printemps de l'année suivante.

La fraise est un fruit consommé frais (fraise de bouche). Elle est également transformée par l'industrie en confiture, sirop et sorbet ou incorporée dans les produits laitiers (fraise d'industrie). La production mondiale est de 3,5 millions de tonnes. Les plus importants producteurs sont les États-Unis (1 million de tonnes), l'Espagne (0,28 million de tonnes) et la Russie (0,21 million de tonnes). La production française est de près de 52 000 tonnes dont 90 % est de la fraise de bouche (données FAO, 2004).

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Ces variétés ont marqué l'évolution de la fraiseraie française jusqu'à la seconde guerre mondiale.

1790, '**Fraise Ananas**', première variété de fraisier à gros fruit blanc, alors que la naissance de cette espèce à gros fruit blanc, rose ou rouge (*Fragaria* × *ananassa*) se situe aux environs de 1740.

1849, '**Vicomtesse Héricart de Thury**' (Graindorge, France), variété non remontante, donnant un fruit très parfumé. C'était la variété la plus populaire au début du XX^e siècle (répandue commercialement sous le nom de 'Ricart' ou de 'La Ricarde').

1865, **‘Docteur Morère’** (Berger, France), variété non remontante, à gros fruit (pour l’époque). Les qualités du fruit ont permis un développement important de sa culture malgré un rendement moyen.

1893, **‘Saint Joseph’** (Abbé Thivolet, France), première vraie variété remontante. Elle est issue de croisements successifs où la variété ‘Roi Henri’ est intervenue. Son fruit est de forme régulière et de calibre acceptable.

1896, **‘Louis Gauthier’** (Louis Gauthier, France), variété non remontante, donnant un fruit blanc rosé et à chair blanche.

1906, **‘Madame Moutot’** (Charles Moutot, France), variété non remontante, à gros fruit qui a été cultivée dans toute l’Europe. Malgré la chair un peu cotonneuse de son fruit et sa mauvaise aptitude au transport, elle représentait encore la moitié des surfaces cultivées au début des années 1960. Cette variété est également appelée ‘Tomate’ ou ‘Chaperon rouge’.

1904, **‘Tardive de Léopold’** (Lierke, Allemagne), variété non remontante, possédant une stérilité mâle monogénique dominante. Encore cultivée dans les années 1950, ce type de plante à fleur sans étamine, nécessitait d’être plantée en mélange avec une variété pollinisatrice de même précocité.

1929, **‘Surprise des Halles’** (Guyot, France), variété non remontante, précoce, se distinguant par sa précocité, sa vigueur et sa fertilité. Son gros fruit d’excellente qualité résistait bien au transport par rapport à celui des autres variétés de l’époque. Elle a connu un grand succès commercial.

1937, **‘Sans Rivale’** (Chapron, France), variété remontante.

Variétés récentes

Elles sont toutes hermaphrodites (et autofertiles).

1947, **‘Cambridge Favourite’** (université de Cambridge, Royaume-Uni), variété non remontante, de saison, à gros fruit rond et clair à chair blanche et douce. Elle a été très cultivée en Bretagne et dans le nord de la France.

1954, **‘Sengana’** (Von Sengbuch, Allemagne), variété non remontante, adaptée à l’industrie de transformation (confiturerie et surgélation) caractérisée par un fruit très coloré et de petite taille. Cette variété est encore prépondérante dans le secteur de la fraise d’industrie, en particulier en Pologne où elle représente la grande majorité de la production.

1957, **‘Redgauntlet’** (SCRI, Dundee, Royaume-Uni), variété semi-remontante, très cultivée au début des années 1980. Elle donne une production d’arrière-saison importante et de bonne qualité alors que sa production printanière est de qualité médiocre.

1960, **‘Gorella’** (IVT, Pays-Bas), variété non remontante, de saison, à gros fruit, dont le rendement est très bon. Elle a eu un grand succès dans toute l’Europe.

1971, **‘Gento’** (R. Hummel, Allemagne), variété remontante, très utilisée par les jardiniers amateurs.

1976, '**Gariguette**' (INRA, France), variété non remontante, précoce, donnant un fruit de très bonne qualité gustative et d'une bonne régularité de forme. Elle connaît, depuis une dizaine d'années, un grand succès commercial malgré un rendement et une tenue du fruit moyens. Cette variété, sélectionnée pour sa qualité gustative, à contre-courant des choix de sélection de l'époque, a permis le développement d'un créneau de fraise de qualité en France, avec une production par ailleurs bien adaptée aux nouvelles cultures hors sol. Deux autres obtentions de l'INRA, 'Belrubi' (1973) et 'Favette' (1978) également sélectionnées pour leur qualité gustative, connurent des succès plus régionaux.

1984, '**Elsanta**' (IVT, Pays-Bas), variété non remontante, de saison, très productive à fruit d'assez bonne qualité. Descendante directe de 'Gorella', elle lui a rapidement succédé surtout en Europe du Nord et a représenté assez rapidement près de 50 % de la production, notamment dans le sud-ouest de la France. Elle a vraiment marqué la production fraisicole.

1984, '**Pajaro**' (université de Californie, États-Unis), variété non remontante précoce qui a représenté un progrès important avec un beau et gros fruit ferme et régulier et un besoin réduit en froid. Elle est bien adaptée au climat californien et est encore très cultivée dans le sud-est de la France. Dans la même série, 'Chandler' fut cultivée dans la région de Saumur (Maine-et-Loire) et en Espagne, où 'Camarosa' lui succéda.

1987, '**Selva**' (université de Californie, États-Unis), variété remontante donnant un fruit de bonne conservation, mais de faible qualité gustative. À la même série appartiennent également 'Fern', 'Brighton', 'Aromas' et 'Diamante', toutes peu gustatives.

1989, '**Darline**' (Darbonne, France), variété non remontante ayant une bonne tolérance à la fatigue des sols. Par contre, le manque de tenue du fruit et le faible rendement ont limité le succès commercial de cette variété. Elle a été surtout cultivée en Bretagne. 'Darboise', 'Darsidor', 'Darletta' et 'Darstella' lui succédèrent.

1991, '**Mara des bois**' (G.A. Marionnet, France), variété remontante très originale donnant un fruit très parfumé et d'excellente qualité gustative, mais un peu fragile. C'est une variété de fraisier *F* × *ananassa*, donc octoploïde, qui n'a pas d'origine génétique commune avec le fraisier des bois *F vesca*. Par contre, l'odeur musquée de son fruit s'apparente à celle de la fraise des bois et explique son nom.

1996, '**Darsélect**' (Darbonne, France), variété non remontante vigoureuse dont le ramassage du fruit est facilité par un pédoncule cassant. Le fruit a une bonne qualité gustative. Elle remplace 'Elsanta' dans le sud de la France.

1997, '**Camarosa**' (Douglas Shaw / Voth et Bringham, États-Unis), variété non remontante, californienne, qui est actuellement la plus cultivée au sud de l'Europe (Italie et Espagne). Elle est également très utilisée pour la transformation industrielle. Elle est très productive et la cueillette du fruit est facile.

1998, '**Ciflorette**' (P. Roudeillac / CIREF, France), variété non remontante et donnant un fruit de très bonne qualité aromatique. Elle fait partie d'une série de variétés ('**Cigaline**', '**Cireine**', '**Ciloë**'), créées pour allier les qualités de 'Gariguette' à des améliorations sur le plan du rendement, de la tolérance aux maladies et de la réduction des intrants, pour la production française.

2000, '**Cirafine**', '**Cijosée**', '**Cirano**' (P. Roudeillac / CIREF, France), variétés remontantes de bonne qualité de plante et de fruit, en cours de développement.

2001, '**Siabelle**' (Pernod Ricard, France), variété non remontante sélectionnée pour l'industrie de transformation. Elle se caractérise par une grande facilité d'équeutage, une couleur de fruit rouge à cœur et une bonne tenue à la décongélation et à la cuisson.

Remarque. Peu de plantes des deux espèces *F. virginiana* et *F. chiloensis* ont été impliquées dans la création de *F. × ananassa*. La base génétique du fraisier à gros fruit est donc très étroite et, jusqu'en 1950, les sélectionneurs européens ont travaillé avec un fond génétique réduit. Depuis l'introduction de nouvelles variétés américaines, l'importance de ce fond a augmenté, même si les sélectionneurs ont tendance à n'utiliser qu'un nombre restreint de variétés comme géniteurs. La multiplication végétative qui permet la multiplication de structures hétérozygotes favorisées par une hétérosis marquée, et le niveau élevé de ploïdie du fraisier contribuent au maintien de la diversité.

Regard sur 50 ans de sélection

Après la seconde guerre mondiale, les stations de recherche publique, en Europe et aux États-Unis, ont relayé les « semeurs » amateurs et professionnels en utilisant des méthodes plus rationnelles et en pratiquant des expérimentations plus rigoureuses. Les critères de sélection ont essentiellement concerné l'adaptation aux exigences de la culture et du commerce modernes. Un progrès continu a été réalisé pour l'amélioration de la grosseur et de la moindre fragilité du fruit. L'INRA s'est démarqué de ce choix en intégrant, dès les années 1960, la qualité gustative du fruit. À cette même période, face à la présence généralisée des viroses dans toutes les fraiseraies européennes, un ensemble de mesures de sélection sanitaire a été mis en œuvre, aboutissant à la production de plants certifiés et à l'éradication de ce problème en culture.

L'INRA a arrêté la sélection du fraisier en 1976, mais poursuit des recherches sur cette espèce, dont une partie en collaboration avec l'interprofession. Des établissements privés ont alors développé des programmes de création variétale ainsi qu'un centre professionnel à Lanxade (Dordogne), le Centre interrégional de recherche et d'expérimentation de la fraise (CIREF), depuis 1988. La sélection est également active dans plusieurs pays d'Europe (Pays-Bas, Italie, Royaume-Uni, récemment Espagne), en Israël, aux États-Unis, au Canada et au Japon.

Caractères importants améliorés

Rendement. La sélection pour le calibre et la fermeté du fruit ont permis de créer des variétés performantes à haute productivité. La sélection sanitaire, en permettant l'élimination des maladies à virus ainsi que d'autres agents pathogènes (*Phytophthora cactorum*, *Verticillium dahliae*,...) a aussi grandement contribué à augmenter la productivité (cf. encadré ci-dessous). Par ailleurs, la maîtrise de l'irrigation est un facteur essentiel du rendement. Bien que l'alimentation en eau ne soit un facteur limitant qu'à certaines périodes, le fraisier réclame en permanence une humidité suffisante. La pratique du goutte-à-goutte et celle du paillage plastique réduisent beaucoup les quantités d'eau nécessaires.

Production de plants certifiés et multiplication *in vitro* du fraisier

Devant l'importance de la dégénérescence causée par les virus, observée dans les fraiseraies à la fin des années 1940, un règlement technique intégrant des mesures sanitaires (thermothérapie, indexage, épuration, suivi des pépinières) a été élaboré, en 1952, pour la production de plants certifiés. Il permet d'offrir des garanties relatives à la pureté variétale et au bon état physiologique et sanitaire. Ce règlement a été modifié, par la suite, en fonction des progrès des connaissances et des techniques.

Dès 1971, la culture de méristèmes *in vitro* a été utilisée pour assainir certaines variétés de fraisier, contaminées par un champignon (*Phytophthora cactorum*), et éliminer des virus. Toutefois, cette technique ne permettait de mettre à la disposition des producteurs de plants qu'un nombre limité de pieds-mères. En 1974, le Laboratoire de la Station des Cultures fruitières et maraîchères de Gembloux (Belgique) précisait les conditions de multiplication du fraisier *in vitro* et en 1975, le Ctifl, se dotait de nouvelles installations pour appliquer ces nouvelles techniques. La production de plants certifiés de fraisier a alors été organisée avec un nouveau schéma de production, homologué en 1978, intégrant la multiplication *in vitro* (celle-ci étant pratiquée par des laboratoires agréés), en particulier pour la production de plants dans les premières générations de multiplication.

Or, dès 1978-79, on a commencé à observer, dans les fraiseraies, parallèlement à des problèmes de fatigue des sols, un certain nombre d'accidents tels qu'une mauvaise reprise des plants, une hétérogénéité des plants, un faible rendement, une hyperfloraison, dont certains paraissaient sans liaison avec des causes parasitaires connues et avec une aggravation d'année en année. Trois années d'expérimentation ont été conduites sur le comportement agronomique de matériels issus de multiplication *in vitro* (obtenus après 3 multiplications ou plus de 30 multiplications successives) et de matériels « standards » (c'est-à-dire n'ayant jamais été multipliés *in vitro*). Ces expérimentations ont permis d'améliorer le schéma de production de plants de fraisier, dès 1981 : la qualité des plants, en particulier la conformité de la reproduction, est renforcée à travers, notamment, une limitation du nombre de cycles de multiplication. La qualité des plants est supérieure à celle du matériel standard en particulier pour l'homogénéité et le rendement de la culture, le poids moyen et la qualité du fruit.

Par ailleurs, tous les accidents rencontrés n'étant pas imputables à la technique de multiplication *in vitro*, des études pédo-climatiques ont été menées pour concourir à résoudre l'ensemble des problèmes.

Aptitudes au transport et à la conservation. L'amélioration de la tenue du fruit en conservation et la résistance au transport ont probablement constitué les deux progrès les plus marquants. Il ont été obtenus en sélectionnant pour la fermeté de la chair et la résistance de l'épiderme du fruit.

Résistance aux maladies. Les sélectionneurs ont toujours éliminé les clones les plus sensibles à l'oïdium (*Sphaerotheca macularis*, anciennement *S. humili*) et au *Botrytis cinerea*. Des progrès modestes ont été réalisés dans le domaine de la résistance aux maladies. Les critères de résistance à la maladie du cœur rouge du rhizome (due au champignon *Phytophthora cactorum*) et à l'anthracnose (due au champignon *Colletotrichum acutatum*) ont été pris en compte pour la sélection des variétés les plus récentes.

Adaptation climatique et précocité. Le fraisier est une espèce dont le cycle annuel est strictement commandé, à ses différents stades, par la durée du jour et la température. Des variétés ayant des besoins en froid réduit, intermédiaire ou élevé pour la levée de dormance ont été sélectionnées pour répondre à des adaptations à des zones climatiques et à des modes de culture différents (Californie, Israël, sud de l'Espagne, du Portugal et de l'Italie).

Caractères qualitatifs du fruit. La présentation, la forme, la fermeté du fruit ont été des caractères communs aux programmes de sélection menés dans le monde et les variétés actuellement développées répondent aux exigences du marché. Par contre, les caractères intervenant dans la qualité gustative, jugée sur la saveur (taux de sucre et acidité) et l'arôme, n'ont été pris en compte que par les sélectionneurs français : 'Gariguet', 'Belrubi', 'Ciflorette' et 'Mara des bois' sont désormais des références de goût. La qualité nutritionnelle a, jusqu'à présent, peu fait l'objet de sélection. On peut, néanmoins, citer l'exemple d'une variété canadienne, 'L'Authentique d'Orléans' (1996, Agriculture et agroalimentaire Canada), sélectionnée pour son rendement élevé, son fruit gros et ferme de bonne durée de conservation, qui présente une teneur élevée en acide ellagique, un anti-oxydant.

Facilité de cueillette. L'architecture de la plante est un facteur clé pour faciliter la récolte : un port dressé ou semi-dressé de la plante avec un bouquet de fleurs se développant au niveau ou au-dessus du feuillage, font partie des critères favorables. Ils ont été intégrés dans les variétés récentes. Pour la fraise d'industrie, le groupement de maturité et la facilité d'équeutage ont été améliorés.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	OUI Le fraisier (<i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i>) est une espèce nouvelle issue de l'hybridation entre <i>F. virginiana</i> et <i>F. chiloensis</i>. Bien que peu utilisés, les croisements interspécifiques ont permis d'introduire certains caractères de résistance aux maladies ainsi que la sensibilité à la photopériode à partir de <i>F. virginiana</i> et <i>F. chiloensis</i>. Des croisements avec <i>F. moschata</i> ont permis d'introduire des résistances aux maladies (cœur rouge du rhizome et anthracnose) et de nouveaux arômes du fruit (génotype hybride CF 2024/CIREF). Des croisements avec <i>F. vesca</i> ont permis d'obtenir une nouvelle espèce (cf. Élévation du niveau de ploïdie). Des croisements avec <i>Potentilla</i> L. spp. ont été tentés et parfois réussis ('Frel', variété à fleur rose).
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI En Allemagne, puis en Suède, une espèce décaploïde a été obtenue (<i>F</i> × <i>vescana</i> Rud. Bauer & A. Bauer) par croisements avec <i>F. vesca</i> pour associer l'arôme de la fraise des bois à la grosseur du fruit de <i>F</i> × <i>ananassa</i> ('Florika', 'Sara', 'Spadecka', 'Rebecka').
Transgénèse	1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1990. En 2000, près de 20 essais au champ de fraisier transgénique avaient été réalisés aux États-Unis. Actuellement, il n'existe cependant pas de variétés de fraisier transgénique autorisées à être commercialisées. Essais. La transformation génétique peut être envisagée pour introduire des résistances aux insectes ou aux maladies fongiques (toxine Bt -<i>Bacillus thuringiensis</i>, et inhibiteur de protéase), pour améliorer la conservation, la texture, le maintien de la couleur à maturité du fruit et enfin pour modifier ses qualités nutritionnelles et organoleptiques.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Le stolon est l'organe de multiplication végétative du fraisier, en conditions horticoles. Le taux de multiplication est très variable (de 10 à 100). La multiplication végétative <i>in vitro</i> est appliquée pour la conservation des clones. En France, elle est employée systématiquement depuis 1971 pour la production de plants certifiés dans les premières générations de multiplication (cf. encadré p. 325). Elle permet aussi d'accélérer la diffusion d'une nouvelle variété. Un mutant de la variété 'Nyoho' a été obtenu après multiplication <i>in vitro</i> ('New Nyoho').

suite...

... suite

Sélection sanitaire	OUI Un ensemble de techniques (thermothérapie, indexage, épuration) a été appliqué de 1950 à 1970. Depuis 1971, la culture de méristèmes <i>in vitro</i> est appliquée systématiquement en France au début du schéma de production des plants certifiés. La sélection sanitaire est mise en œuvre tout au long de la production en pépinière des plants certifiés vis-à-vis de nombreux agents parasitaires (virus, <i>Phytophthora cactorum</i> , <i>Verticillium dahliae</i> , <i>Phytophthora fragariae</i> , <i>Xanthomonas fragariae</i> , <i>Bacteria like organism</i> (BLO), <i>Colletotrichum acutatum</i>).
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	OUI Les premières plantes de fraisier du Chili rapportées par Frézier en 1740 étaient mâles stériles. On retrouve cette stérilité mâle (monogénique dominante) dans certaines variétés ('Tardive de Léopold', 'Pandora', 'Yamaska'). Ce caractère plutôt gênant n'a pas été utilisé en sélection, car il nécessite la culture conjointe d'une variété pollinisatrice.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires sont développés en France (INRA et GEVES), aux Pays-Bas (PRI), au Royaume-Uni (HRI), en Espagne (IRTA) et aux États-Unis (USDA). Des marqueurs sont utilisés pour étudier la structuration de la diversité génétique. Plus particulièrement, les marqueurs ISSR ont été développés pour l'identification variétale. Une première carte de liaison génétique du fraisier cultivé, <i>F. × ananassa</i> , a été développée à l'INRA (2003). Des marqueurs moléculaires liés à des gènes majeurs de résistance à <i>Phytophthora fragariae</i> PRI, Pays-Bas) et à <i>Colletotrichum acutatum</i> (INRA, France) ont été décrits depuis 1997. De même, les premiers QTL liés à des composants biochimiques du goût du fruit ont été identifiés (INRA, France). Ces travaux de marquage devraient permettre d'introduire la sélection assistée par marqueurs dans les programmes de création variétale.

SCHÉMAS DE SÉLECTION ET STRUCTURES VARIÉTALES

Schémas de sélection	Sélection massale ou généalogique, puis sélection récurrente des meilleurs génotypes. Des croisements intraspécifiques entre plantes hétérozygotes sont réalisés. Les descendance sont analysées et les individus les plus intéressants sont multipliés végétativement. Après expérimentation, les clones remarquables sont diffusés.
Structures variétales	Variété clone. La très grande majorité des variétés de fraisier sont des clones. Variété hybride. Des variétés hybrides, remontantes, reproductibles par semences, sont développées par un sélectionneur privé néerlandais ('Elan', 'Karan').

Perspectives d'amélioration

Le fraisier est une plante dont la culture est toujours en extension dans le monde (Amérique du Sud, Asie, Moyen-Orient), principalement dans les pays à faible coût de main d'œuvre. La consommation de fraises ira croissant, suivant l'augmentation du pouvoir d'achat des consommateurs (Europe de l'Est, Asie,...). Par ailleurs, certaines sont aussi destinées à la transformation et font l'objet de productions spécifiques avec une gamme variétale adaptée, en particulier en Pologne et en Amérique centrale.

En Europe, le rapide transfert de la culture au sol vers la culture hors sol impose des adaptations variétales et de nouvelles connaissances sur la physiologie de la plante.

De nombreux pays qui cultivent le fraisier traditionnellement continuent la recherche variétale, tandis que d'autres, nouveaux, s'y lancent. Mais, c'est surtout le fait de sociétés privées qui utilisent les méthodes classiques de l'hybridation et de la sélection agronomique, les instituts de recherche publique ou privée travaillant surtout les nouvelles technologies (transgénèse, carte génétique et marqueurs moléculaires).

Les orientations actuelles vers la culture raisonnée et l'agriculture durable imposent le choix de variétés rustiques et tolérantes aux maladies et aux parasites. Les travaux de sélection devront donc accentuer leurs efforts dans ce sens.

Les efforts du marché vers la segmentation de l'offre des fraises, devraient redonner l'espoir de voir se développer des variétés aromatiques. Certains sélectionneurs travaillent avec cet objectif.

Enfin, l'intérêt porté par les consommateurs à la valeur nutritionnelle et diététique des fruits et légumes, place la fraise en bonne place et certains programmes de sélection incorporent déjà ces critères.

La fraise demeure bien dans l'esprit du consommateur un fruit que l'on mange pour son plaisir et pour sa santé et donc que l'on accepte de payer un peu plus cher que d'autres produits frais.

La fraise transformée connaît aussi une extension constante, bien au-delà des jus et confitures, avec les desserts lactés, compotes ou mélanges de céréales. Seuls quelques travaux de sélection sont conduits spécifiquement alors que la demande des industriels est forte pour des fraises modernes bien adaptées aux différents procédés industriels.

Caractères à améliorer

Rusticité et résistance aux maladies. Il reste à réaliser de grands progrès afin de réduire les intrants et l'application de produits phytosanitaires. Le recours aux croisements interspécifiques est toujours d'actualité pour introduire des résistances, d'autant plus que de nouveaux agents pathogènes sont récemment

apparus en France (anthracnose due au champignon *Colletotrichum acutatum*, agent pathogène de quarantaine, et chlorose marginale due au *Bacterial like organism* (BLO)). Mais, le fraisier cultivé se croise difficilement avec des espèces d'autres niveaux de ploïdie. La multiplicité des agents parasitaires des racines et l'interaction forte entre la sensibilité variétale et le stade physiologique où celle-ci est exprimée, rendent la sélection difficile. Par ailleurs, la désinfection chimique du sol avant plantation, principalement au bromure de méthyle, est en cours de restriction réglementaire. La protection contre les parasites telluriques va donc devenir un objectif prioritaire. Pour répondre à cet important défi, des programmes de sélection ont été récemment engagés.

Qualité gustative. Des améliorations peuvent encore être apportées dans ce domaine. Ce caractère est particulièrement important pour le consommateur français et pour l'avenir de la consommation de fraise en Europe.

Durée de la période de production. La réalisation de variétés à production plus étalée (deuxième période de production après celle de printemps) ou à production continue, remontantes, est à l'étude avec le développement de la culture hors sol sous serre permettant d'allonger la période de production.

Faibles exigences en fertilisants azotés. Ce caractère est pris en compte indirectement dans les programmes de sélection récents, la sélection étant pratiquée en conditions de sol assez pauvre et de faibles intrants.

Adaptation à la production industrielle. Des variétés spécifiquement adaptées à la transformation par l'industrie pour la fabrication de produits à forte valeur ajoutée sont de plus en plus demandées.

Réduction des coûts de production. Ce critère est un objectif constant.

Techniques à développer

Des marqueurs moléculaires liés à des gènes majeurs de résistance à *Phytophthora fragariae* et à *Colletotrichum acutatum* ont été décrits depuis 1997. Par ailleurs, l'INRA, en collaboration avec le CIREF, développe une carte de liaison génétique sur laquelle les premiers QTL liés à des caractères biochimiques du fruit ont été placés. Ces travaux de marquage devraient permettre d'utiliser les marqueurs moléculaires liés à certains caractères d'intérêt dans les programmes de sélection classique.

Inscription et protection des variétés en France

1960, ouverture du catalogue officiel fraisier.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre annexe variétés anciennes pour jardiniers amateurs instituant un règlement technique annexe d'inscription.

En 2003, 113 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 1 variété était inscrite au registre annexe variétés anciennes pour jardiniers amateurs. Il

n'y a pas de catalogue européen pour l'espèce fraisier. 90 variétés sont protégées dans l'Union européenne et 50 étaient en demande de protection en 2003.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 41 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. Ceux-ci sont complétés par 16 caractères nationaux. Une procédure d'Autorisation provisoire de vente (APV) permet la commercialisation sur le territoire français des variétés candidates durant la période d'inscription. La durée minimale d'examen de DHS est de 2 années. À l'issue de cette période, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale pendant 20 ans. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne durant 25 ans.

Le GEVES a défini, à l'aide de marqueurs moléculaires ISSR, un profil type pour 133 variétés.

Le GEVES maintient, à Brion (Maine-et-Loire), sous tunnel à l'abri des insectes pour éviter les contaminations virales, une collection de référence de plus de 150 variétés, nécessaire à la caractérisation des nouvelles sélections.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des plants. En 2002, 56 variétés étaient concernées et, au cours de ces cinq dernières années, 86 millions de plants commerciaux ont été annuellement certifiés en moyenne.

Pour en savoir plus

Site internet du conservatoire d'espèces de *Fragaria* aux États-Unis : <http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=11324> ; avec le catalogue des génotypes de *Fragaria* spp. : <http://www.ars-grin.gov/cor/catalogs/fracult.html>

Boulineau F. et Retailleau J.-M., 2003. *Les variétés de fraisier anciennes, actuelles, nouvelles*. Version 2. CDRom. CDRom Multimedia.

Boxus P., 1974. The production of strawberry plants by *in vitro* micropropagation. *J. Hortic. Sci.*, 49, 209-210.

Brossier J.-O., 1962. Variétés de fraisiers non remontantes inscrites au catalogue des espèces et variétés, leur détermination et leur description. *Ann. Amélior. Plant.*, 12, n° hors série, 1-142.

Chaux C. et Foury C., 1994. Fraise. Dans : *Productions légumières*. Éditions Tec & Doc, Paris, tome 3, 477-563.

Denoyes-Rothan B., Guérin G., Nourisseau J.-G., Morzières J.-P., Baudry A., Lesgourgues D. et Clerjeau M., 1996. Situation de l'anthracnose du fraisier en France. *PHM Rev. Hortic.*, 371, 23-27.

Duchesne A. N., 1766. *Histoire naturelle des fraisiers*. Édition Firmin-Didot, Paris, 324 p.

- Gibault G.**, 1912. Fraisier. Dans : *Histoire des légumes*. Librairie horticole, Paris, 347-361.
- Haymes K. M., Henken B., Davis T. M. et van de Weg W. E.**, 1997. Identification of RAPD markers linked to a *Phytophthora fragariae* resistance gene (*Rpf 1*) in the cultivated strawberry. *Theor. Appl. Genet.*, 94, 1097-1101.
- Haymes K. M., van de Weg W. E., Arens P., Maas J. L., Vosman B. et Den Nijs A. P.**, 2000. Development of SCAR markers linked to a *Phytophthora fragariae* resistance gene and their assessment in European and North American strawberry genotypes. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 125 (3), 330-339.
- Hennion B. et Veschambre D.**, 1997. I. *La fraise : maîtrise de la production*. Éditions Ctifl, Paris, 103 p.
- Hietaranta T., Linna M. M., Palonen P. et Parikka P.**, éd., 2002. Proceedings of the fourth international Strawberry symposium. *Acta Hortic.*, 567, 2 volumes, 388 p. et 826 p.
- Jimenez-Bermudez S., Redondo-Navado J., Munoz-Blanco J., Caballero J. L., Lopez-Aranda J. M., Valpuesta V., Pliego-Alfaro F., Quesada M.A. et Mercado J. A.**, 2002. Manipulation of strawberry fruit softening by antisense expression of a pectate lyase gene. *Plant Physiol.*, 128 (2), 751-759.
- Lerceteau-Köhler E., Guérin G., Moing A., Renaud C., Roudeillac P., Laigret F. et Denoyes-Rothan B.**, 2002. Analyse du génome du fraisier cultivé octoploïde. Colloque Bordeaux, INRA/CTIFL. *Les apports de la biologie moléculaire en arboriculture fruitière*. 4 p.
- Lerceteau-Köhler E., Guérin G., Laigret F. et Denoyes-Rothan B.**, 2003. Characterization of mixed disomic and polysomic inheritance in the octoploid strawberry (*Fragaria x ananassa*) using AFLP mapping. *Theor. Appl. Genet.*, 107, 619-628.
- Mathews H., Wagoner W., Kellogg J. et Bestwick R.**, 1995. Genetic transformation of strawberry : stable integration of a gene to control biosynthesis of ethylene. *In vitro Cell. Dev. Biol., Plant*, 31 (1), 36-43.
- Navatel J.-C.**, 1979. La multiplication *in vitro* du fraisier. *Ctifl Documents*, 60, 53-63.
- Navatel J.-C., Varachaud G., Roudeillac P. et Bardet A.**, 1986. Multiplication *in vitro* : comportement agronomique de plants de fraisier issus de pieds-mères produits par micropropagation par rapport au matériel classique. *Infos Ctifl*, 21, 2-8.
- Pitrat M. et Risser G.**, 1977. Étude de la sensibilité variétale du fraisier à *Phytophthora cactorum* après contamination provoquée. *Ann. Amélior. Plant.*, 27 (1), 49-60.
- Rigotti S., Gindro K., Richter H. et Viret O.**, 2002. Characterization of molecular markers for specific and sensitive detection of *Botrytis cinerea* Pers. in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) using PCR. *FEMS Microbiol. Lett.*, 209 (2), 169-174.
- Risser G.**, 1963. Description de quelques variétés de fraisier. *Ann. Amélior. Plant.*, 13, n° hors série, 1-38.
- Risser G.**, 1968. Description de quelques variétés de fraisier. *Ann. Amélior. Plant.*, 18, n° hors série, 1-52.
- Risser G.**, 1975. Description de quelques variétés de fraisier. *Ann. Amélior. Plant.*, 25, 4, 429-480.
- Risser G.**, 1978. Quelles variétés choisir pour une production de qualité? *PHM*, 191, 37-40.
- Risser G. et Navatel J.-C.**, 1997. II. *La fraise : plant et variétés*. Éditions Ctifl, Paris, 299 p.
- Risser G.**, 2003. Fraisiers. Dans : *Histoires de légumes, des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 324-337.
- Roudeillac P.**, 1993. Objectives and methods of the strawberry breeding program sponsored by the CIREF. *Acta Hortic.*, 348, 117-123.
- Roudeillac P.**, 2003. The strawberry of the future : a necessary alliance between the discoveries of the breeders and the how-know of the growers for food safety and consumer satisfaction. *Acta Hortic.*, 626, 75-83.

Urruty L., Giraudet J. L., Lek S., Roudeillac P. et Montury M., 2002. Assessment of strawberry aroma through SPME/GC and ANN methods. Classification and discrimination of varieties. *J. Agric. Food Chem.*, 50 (11), 3129-3136.

Watt K., Graham J., Gordon S. C., Woodhead M. et McNicol R. J., 1999. Current and future transgenic control strategies to vine weevil and other insect resistance in strawberry. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 74 (4), 409-421.

Le haricot

Phaseolus vulgaris L. ($2n = 2x = 22$)
(Fabacées ou Papilionacées)

Présentation de l'espèce

Le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) vient d'Amérique, avec un centre d'origine méso-américain et un autre andin. Cette plante cultivée depuis des millénaires au Pérou et au Mexique, y a été domestiquée de façon indépendante, conduisant à deux groupes distincts qui ne semblent pas être parfaitement inter-compatibles. Il était et est consommé non seulement sous forme de grains, souvent associés au maïs *Zea mays* L. (subsp. *mays*) (il s'avère que les protéines de ces deux espèces sont très complémentaires sur le plan diététique), mais aussi sous forme de grains « extrudés » (à la manière du pop-corn). Les feuilles étaient aussi consommées en salade ou potage. Le haricot a été introduit en Europe, pour la première fois par Christophe Colomb lui-même. Bien d'autres introductions de haricot amérindien suivirent. Ces plantes dont beaucoup de génotypes fleurissaient en jours courts connurent des problèmes de mise à fleur en Europe. L'histoire des premières étapes de sa diffusion est obscurcie par la présence, depuis l'Antiquité, du niébé, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. subsp. *unguiculata*, très répandu en Afrique tropicale et présent dès l'Antiquité dans la Méditerranée. Le niébé a une gousse longue et fine. Il ressemble au haricot amérindien, en a les mêmes usages et a porté des noms populaires comme *phaseolus* en latin, ou comme *dolichos* en grec ancien, transférés ensuite au haricot amérindien. La sous-espèce *unguiculata* subsiste encore aujourd'hui en Europe avec « le haricot à l'œil noir », consommé pour ses grains. Le haricot apparaît officiellement en France en 1553, à l'occasion du mariage de Catherine de Médicis avec le futur roi Henri II. Il se répand ensuite dans tout le Bassin méditerranéen. Cependant, jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, le haricot fut consommé presque exclusivement sous forme de grain (sec ou non). Les Italiens ont été les premiers à consommer la gousse immature, bientôt suivis par les autres pays méditerranéens. Les deux groupes méso-américain et andin sont aujourd'hui difficiles à intercroiser, ce qui constitue un indice de début de spéciation.

Le haricot est une espèce autogame, annuelle, multipliée par semences. Le taux d'allogamie, de l'ordre de 5 % maximum, est très variable d'un génotype à l'autre. Les risques d'hybridation entre deux champs sont donc faibles, mais réels. Les seuls croisements interspécifiques possibles se font avec le haricot d'Espagne, *P. coccineus* L., et dans un seul sens.

La variabilité est très importante chez cette espèce, que ce soit au niveau morphologique (couleur, taille, forme de la gousse et celles du grain,...) ou au niveau physiologique (précocité et résistance aux maladies) ou encore pour l'architecture de la plante (on peut distinguer jusqu'à 5 classes, du haricot à rames à croissance indéterminée au haricot nain à croissance parfaitement déterminée).

De nombreuses collections existent, en particulier au CIAT à Cali (Colombie) (32 000 génotypes), à l'INRA de Versailles (Yvelines), au GEVES de Brion (Maine-et-Loire) et chez les sélectionneurs privés qui ont des collections de travail.

Production et utilisation

Le produit récolté est :

- soit une gousse, fruit au stade immature, dans le cas du haricot vert. Ce produit est un légume consommé frais, surgelé ou en conserve (appertisé, ou autrefois en saumure). Cette gousse peut être verte, jaune (haricot beurre) ou violette, panachée ou non de violet ou de rouge. La gousse peut être cylindrique ou aplatie. Dans certains pays, on distingue le haricot vert à gousse cylindrique, que l'on casse (*snap bean* en anglais, *Brechbohne* en allemand) et celui à gousse plate que l'on coupe en diagonale pour le consommer (« haricot sabre », *Schnittbohne* en allemand). Ce dernier type est apprécié dans le nord de l'Europe ;
- soit une graine exalbuminée, dans le cas du haricot grain. Ce produit est un légume surtout récolté sec, mais aussi demi-frais ou frais. Dans ces deux derniers cas, il peut aussi être appertisé ou surgelé.

On distingue différents types qui peuvent être classés selon :

Le type de croissance de la plante

Le haricot à rames. Il a une croissance indéterminée. C'est une liane qui nécessite un tuteurage. Actuellement, elle est surtout réservée aux cultures sous abri et aux jardins familiaux en Europe.

Le haricot nain. Il a une croissance déterminée. Avec un bourgeon floral en position terminale, c'est un buisson bas. C'est le type le plus cultivé actuellement, car il se prête à la culture en plein champ et à la mécanisation.

Il existe aussi des types « semi-déterminés » principalement dans le type *Great Northern*, originaire des États-Unis. Ces types ont une végétation groupée à la base et émettent une ou plusieurs tiges volubiles qui peuvent atteindre 0,8 à 1 m, dont la production est destinée à la consommation en grain sec.

La structure fibreuse de la gousse

Une structure longitudinale, le fil, et une structure oblique, le parchemin, déterminent la nature et l'âge de l'organe consommé.

Le haricot mangetout. Il a une gousse sans fil et avec peu ou pas de parchemin. Sa gousse est récoltée au stade immature. Actuellement, le mangetout est cultivé par les jardiniers amateurs (gousse longue et production échelonnée pour faciliter la récolte), mais il est surtout cultivé en plein champ pour les conserveries et récolté à la machine (gousse de 12 cm maximum, grain blanc et production groupée). Il existe deux grands types : le type à gousse verte et le type à gousse jaune (haricot beurre).

Le haricot filet. Il se caractérise par une gousse avec fil et parchemin. La gousse longue, droite et fine doit être récoltée très jeune. Le filet est actuellement surtout cultivé par les jardiniers amateurs. Il doit être récolté manuellement tous les deux jours. L'apparition inéluctable du fil et celle du parchemin rendent les gousses inconsommables à partir d'un certain âge et ces deux critères constituent un bon indicateur de qualité.

Le haricot grain, ou à écosser. Il est caractérisé par une gousse souvent avec fil (souvent seulement car le type Coco n'a pas de fil) et parchemin (le parchemin est un tissu qui facilite le battage de la gousse). La plante est récoltée lorsque le grain est formé en demi-sec ou en sec. On distingue :

- les haricots récoltés à un stade grain immature (ou demi-sec). Le plus important est le type Coco, mais on cultive aussi les types Michelet, Borlotto, etc. Ils sont vendus en gousses et possèdent de gros grains pour faciliter l'écosage chez la ménagère. Une partie de la production est éventuellement récoltée directement en grains comme les pois pour la surgélation industrielle ;
- les haricots récoltés à complète maturité (grain sec). Ils peuvent être vendus en l'état ou appertisés (ils sont alors « régénérés », c'est-à-dire réhumidifiés) et sont généralement blancs ou verdâtres. On distingue plusieurs types selon la forme : perle (*pea bean* ou *navy bean*), *great northern* et lingot. On peut aussi trouver des grains colorés rouges ou noirs, dont la consommation est marginale en France, mais en expansion avec la mode des cuisines ethniques ;
- le flageolet vert. Ce sont des haricots à grain blanc dont la chlorophylle est persistante, ils sont donc verdâtres. C'est surtout une spécialité française. La plus grande partie est récoltée au stade demi-sec et est destinée aux conserveries pour l'appertisation et la surgélation. Ils sont alors récoltés avec les mêmes machines que les pois. Une partie de plus en plus faible de la production est récoltée en grains secs pour être vendue en épicerie. Contrairement aux grains blancs secs, la « régénération » des grains de flageolet vert est interdite en France pour l'industrie.

Le haricot est donc un légume très polymorphe dans ses formes et ses utilisations. Il peut être considéré comme un légume vert ou un féculent, un produit vivrier ou une plante industrielle de grande culture qui peut être destiné au marché de frais, au négoce ou à la conserverie.

Le haricot grain est un produit vivrier dans de nombreux pays en voie de développement où il constitue la principale source de protéines (il en contient 24 % qui sont riches en lysine) pour l'alimentation humaine. Il n'est digestible qu'à l'état cuit.

Les données statistiques disponibles sont à considérer avec prudence étant donné le caractère vivrier de l'espèce, la confusion fréquente avec d'autres espèces (comme les autres *Phaseolus*, les *Vigna* asiatiques et africains et le lablab *Lablab purpureus* (L.) Sweet) (appelé « antaque » à La Réunion, et « pois boucoussou » ou « pois bourcoussou » aux Antilles) et les différents types de produit récolté (gousse, grain sec ou demi-sec).

La production mondiale de haricot sec est de 18,4 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont le Brésil (3 millions de tonnes), l'Inde (2,9 millions de tonnes), la Chine (1,8 million de tonnes), le Myanmar (ex Birmanie) (1,6 million de tonnes) et le Mexique (1,4 million de tonnes). La production française est beaucoup plus modeste et est estimée à 10 000 tonnes (données FAO, 2004).

La production mondiale de haricot vert s'élève à 6,3 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine (2,3 millions de tonnes), l'Indonésie (0,78 million de tonnes) et la Turquie (0,54 million de tonnes). La France produirait 100 000 tonnes (données FAO, 2004). En Chine, une grande partie pourrait être en réalité du dolique asperge (ou haricot-kilomètre), *Vigna unguiculata* ssp. *sesquipedalis* (L.) Verdc., à très longue gousse, qui n'a pas droit à la dénomination « haricot vert » en France. En effet, seules les espèces *Phaseolus vulgaris* et *P. coccineus* y ont droit.

Les organismes professionnels français font état de données sensiblement différentes : 328 000 tonnes de haricot vert et 40 000 tonnes de flageolet vert de conserve selon l'Union nationale interprofessionnelle des légumes transformés (Unilet) pour 2004 et 8 700 tonnes de haricots secs (données Agreste).

Histoire des variétés cultivées en France

Haricot à rames

Variétés anciennes

Ce sont des variétés génériques, c'est-à-dire un ensemble de génotypes ayant des caractéristiques agronomiques communes.

XVIII^e siècle, **'Haricot de Soissons gros blanc à rames'**, variété très estimée pour la consommation de grain à l'état sec. Le grain, de 2 à 2,5 cm de long, est réniforme. À l'époque de la Révolution, sa culture répandue dans les communes voisines de Soissons, donnait lieu à un important commerce vers d'autres régions de France. De nos jours, le grain de *P. coccineus* est parfois vendu sous ce nom.

XVIII^e siècle, **‘Coco de Prague marbré’**, ou **‘Haricot châtaigne’** ou **‘Coco rose’**, une des variétés les plus anciennes et les plus répandues. Le grain marbré de rose vif est très féculent et sa saveur rappelle celle de la châtaigne.

1840, **‘Haricot d’Alger’** ou **‘Beurre noir à rames’**, probablement le plus ancien haricot beurre (ou à gousse jaune). Hâtive et productive, cette variété résiste bien à la chaleur.

‘Haricot tarbais’, variété de type grain, semée avec le maïs et la courge dans le Béarn et la Bigorre. Le maïs sert alors de tuteur.

‘Phénomène’, variété très haute (3,50 m), très productive, consommée en mangetout et en grain frais ou sec. Le grain est blanc et de très bonne qualité.

Variétés récentes

Ce sont toutes des lignées pures.

1981, **‘Diamant’** (INRA, France), variété de type filet, adaptée à la culture sous abri, très vigoureuse et ayant un bon rendement.

1985, **‘Emérite’** (INRA, France), variété de type mangetout, adaptée à la culture sous abri.

1999, **‘Alaric’** (Association Haricot tarbais, France), variété de type grain, autorisée pour la production de haricot tarbais avec Label rouge et IGP.

1999, **‘Robin’** (Gautier, France), variété de mangetout à gousse plate, turgescente et sucrée. Ce type de haricot mangetout dénommé « haricot sabre » est très consommé en Espagne et dans tous les pays méditerranéens.

Haricot nain

Les caractères de couleur de gousse : beurre, violet ou marbré facilitent le repérage de la gousse parmi le feuillage vert pour la cueillette manuelle.

Variétés anciennes

‘Coco jaune de la Chine’, c’est en fait un Coco jaune du Chili dont l’introduction, en Europe notamment, a été facilitée par son aptitude à la floraison en jours longs. Répandu dans le monde entier, son grain est ovoïde et de couleur jaune soufre.

Vers 1878, **‘Chevrier’**, variété repérée par M. Chevrier à Brétigny-sur-Orge (Essonne) dans une population de flageolet blanc, et mise au commerce par M. Forgeot. Cette variété de flageolet est à grain naturellement verdâtre, de forme nettement réniforme, à condition que la plante soit arrachée un peu avant maturité et la gousse séchée à l’ombre. Cette variété a été très cultivée aux environs de Paris.

‘Coco paimpolais’, variété de type grain, à grosse graine sphérique, vendue en gousses et consommée en demi-frais.

‘Lingot de Vendée’ et **‘Lingot du Nord’**, deux variétés de type grain, à grain très long, consommé en sec et parfois en conserve de luxe.

‘Triomphe de Farcy’, ‘Fin de Bagnols’, variétés de type filet à gousse marbrée de violet. Elles sont très connues des jardiniers amateurs.

‘Princesse nain double de Hollande sans fil’, variété de type mangetout, à grain blanc, très utilisée pour la conserverie dans les années 1960 où elle représentait 50 % des surfaces cultivées pour l’industrie.

1959, **‘Processor’** (Ferry-Morse, États-Unis), variété de type mangetout vert foncé, originaire des États-Unis. Résistante au virus I de la mosaïque commune par hypersensibilité, elle a servi de géniteur à beaucoup de variétés modernes et a été très cultivée dans les années 1960 en France.

Variétés récentes

Ce sont toutes des lignées pures.

1969, **‘Maxidor’** (INRA, France), variété de type mangetout beurre, une des premières variétés résistantes « totales » à l’anthracnose. Elle est, de plus, résistante à la mosaïque commune (virus I) par hypersensibilité.

1972, **‘Internor’** (Séminor, France), variété de type mangetout vert, adaptée aux récolteuses mécaniques de l’époque.

1972, **‘Vernel’** (Vilmorin-Andrieux, France), variété de type grain flageolet. C’est la première variété de ce type résistante à l’anthracnose.

1975, **‘Elsa’** (INRA, France), première variété de type grain flageolet de conserve, résistante à la mosaïque commune (virus I) par hypersensibilité ainsi qu’à l’anthracnose.

1977, **‘Pros’** (Pop-Vriend, Pays-Bas), première variété de type mangetout vert d’industrie, la plus cultivée à la fin des années 1970. Elle a précédé les variétés à gousse extra-fine. Cette variété est commercialisée sous la marque Gitana®.

1978, **‘Kilt’** (INRA, France), variété de type grain ‘Coco paimpolais’, résistante à l’anthracnose et à la mosaïque commune (virus I) par hypersensibilité.

1980, **‘Vaillant’** (INRA, France), variété de type mangetout vert, première variété résistante à la graisse à halo. Cette variété est à la base de toutes les autres variétés européennes résistantes à la graisse. Elle est aussi résistante à l’anthracnose et résistante au virus I de la mosaïque commune par hypersensibilité.

1983, **‘Faria’** (Caillard, France), variété de type mangetout vert d’industrie qui a marqué une première étape dans l’évolution de la finesse de la gousse, avec 60 % de calibre extra-fin.

1985, **‘Cabri’** (Clause, France), variété de type mangetout vert, à gousse très fine. Elle est à l’origine de beaucoup de variétés actuelles à gousse fine. Elle a marqué une deuxième étape dans l’évolution de la finesse de la gousse, avec 80 % de calibre extra-fin.

1990, **‘Capitole’** (Clause SP, France), première variété de type mangetout vert à gousse extra-fine, à production groupée adaptée à la récolte mécanique. Elle est à l’origine de la majorité du matériel actuel à gousse extra-fine.

1990, '**Niki**' (Royal Sluis, Pays-Bas), variété de type mangetout vert à gousse extra-fine pour l'industrie, qui a été très cultivée.

1990, '**Safran**' (Clause SP, France), première variété de type mangetout beurre d'industrie, à gousse très fine, adaptée à la récolte mécanique.

1997, '**Booster**' (Vilmorin, France), variété de mangetout vert d'industrie, originale par son port particulièrement bien adapté à la récolte mécanique et produisant 100 % de gousses extra-fines. C'est la première variété pour les emblavements français depuis 1998 (*cf.* encadré p. 342).

Remarque. Dans le type mangetout de conserve, il est probable qu'il y a eu une perte importante de variabilité dans les années 1950-1970, en raison de la convergence vers un type défini précisément dans un cahier des charges établi par les industriels, pour l'architecture de la plante, la longueur, la couleur et la forme de la gousse et son calibre, la couleur du grain et des conditions de récolte groupée.

Regard sur 50 ans de sélection

L'INRA, à partir des années 1950, s'est surtout attaché à la sélection pour la résistance aux maladies, les plus graves d'entre elles étant transmises par la graine. Les travaux de sélection de l'INRA sont arrêtés depuis 1992. Travaillant en liaison étroite avec l'Institut, les sélectionneurs privés ont mis à profit les résistances obtenues. Ceux-ci ont aussi amélioré les variétés en vue de la mécanisation de la culture et de l'adaptation du produit aux procédés modernes de conservation.

Les progrès, obtenus par sélection classique, sont beaucoup plus nets chez les haricots filet et mangetout que chez le haricot grain, à cause de l'importante proportion de semences fermières chez ce dernier.

Le haricot est une espèce très sélectionnée dans le monde, avec des orientations très différentes selon le produit consommé.

Caractères importants améliorés

Résistances aux maladies. Trois maladies causaient des dégâts de grande importance économique, d'autant qu'elles se transmettent par la graine. De bonnes résistances ont été trouvées :

– *pour l'anthracnose*, maladie des taches noires causée par un champignon (*Colletotrichum lindemuthianum*), un seul gène (*Are*) est utilisé jusqu'à présent en Europe de l'Ouest où il est connu depuis environ un demi-siècle, et bien que quelques races du champignon assez peu répandues puissent l'attaquer, il n'a pas été contourné. C'est un bel exemple de « durabilité » d'une résistance génétique, monogénique, exploitée dans des variétés commerciales sur une très grande

Révolution variétale chez le haricot vert : la course à l'extra-fin

Jusque dans les années 1980, la conserverie disposait de deux produits : le filet ou le mangetout, le premier ayant fait la réputation du haricot vert français. Mais, il fallait le récolter manuellement tous les deux jours et il y avait peu d'espoir de mécanisation. Les conserves françaises de mangetout étaient en général faites avec des gousses entières contrairement à celles de nombreux pays dont les États-Unis. Les industriels ont payé très tôt les producteurs selon le calibre (extra-fin, le plus cher) de la gousse (c'est-à-dire l'âge de la gousse) cherchant à se rapprocher du produit frais de type filet. Cela a encouragé les sélectionneurs à créer des variétés donnant une grande proportion de gousses fines (gousses génétiquement fines et production groupée). À partir des années 1970, les travaux de sélection se sont intensifiés dans le type mangetout et une première série de variétés à gousses fines, longues et sans fil et à maturité groupée, a permis de mécaniser la récolte. En 1975, est apparue un nouveau type de machine plus performant, qui a remis en cause l'intérêt des variétés récemment créées et a nécessité de sélectionner pour une autre architecture de plante (plante vigoureuse avec gousses bien réparties).

La course vers la finesse de la gousse a continué vers un calibre très fin (diamètre de 6,5 à 8 mm), puis un calibre extra-fin (diamètre inférieur à 6,5 mm). Les variétés diffusées depuis la fin des années 1990, sont capables de produire jusqu'à 100 % de gousses extra-fines. Aujourd'hui, les variétés extra-fines occupent 60 % des surfaces de haricot vert destinées à l'industrie.

Les variétés de mangetout d'aujourd'hui sont donc souvent à gousses aussi fines que les variétés de type filet d'antan.

échelle. Il existe d'autres gènes de résistance en réserve qui ont parfois été introduits dans des variétés possédant déjà le gène *Are* ;

– pour la mosaïque commune causée par le virus I, on utilise un gène d'hypersensibilité, les gènes d'immunité ayant rapidement montré leur limite (surpassement) ;

– pour la graisse à halo, maladie causée par une bactérie *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*, on utilise une tolérance oligogénique (plus difficile à introduire). Environ la moitié des variétés inscrites actuellement sont tolérantes ;

– pour la graisse à *Xanthomonas phaseoli*, qui pose de graves problèmes en Amérique du Sud surtout et parfois en Europe lors des étés chauds, le CIAT a sélectionné des géniteurs de tolérance (mais ils n'ont pas été utilisés en Europe jusqu'en 1993).

Finesse de la gousse. Pour répondre à la nécessité de mécaniser la récolte, c'est le type mangetout qui a été retenu. Une forte sélection à partir de croisements avec des types filets a permis d'obtenir, dans ce type, une gousse proche de celles du type filet, c'est-à-dire de calibre très fin et même extra-fin, de longueur suffisante (12 cm car la hauteur d'une boîte de conserve est de 10 cm) et d'une bonne rectitude malgré l'absence de fil (cf. encadré ci-dessus).

Groupement de maturité. Les variétés récentes sont adaptées à la récolte mécanique grâce à une floraison abondante et de courte durée, une maturité groupée

et une architecture de plante qui limitent les pertes. L’homogénéité de maturité conditionne en même temps le rendement et la qualité du produit. Ce caractère est aussi en relation avec la finesse de la gousse.

Longueur, couleur et forme de la gousse. En plus de la finesse, il a fallu sélectionner des variétés à gousse droite et sans fil, de longueur raisonnable (12 cm) et de section ronde pour l’appertisation, et de couleur homogène foncée pour la surgélation.

Flatulence. Cet inconvénient, qui résulte uniquement de la consommation du haricot grain, est dû au stachyose, sucre en C18, inassimilable par l’intestin, mais que les bactéries du colon fermentent avec production de divers gaz. Cet inconvénient semble réduit après appertisation. Des travaux de sélection pour limiter cet inconvénient ont été effectués au Royaume-Uni.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D’INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI Le caractère « flageolet vert » est une mutation qui a été découverte par M. Chevrier, à Brétigny-sur-Orge dans les années 1870. Avant cette date, on colorait les grains de flageolet blanc avec des sels de cuivre pour les rendre verdâtres !
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	ESSAIS De nombreux essais de transfert d’une tolérance aux basses températures et d’introduction de stérilité mâle par croisements avec <i>P. coccineus</i> ont été effectués, mais ils n’ont pas abouti à des variétés car les recombinaisons génétiques ne sont pas aussi efficaces qu’on pouvait l’espérer. À noter que les croisements sont plus faciles à réussir lorsque <i>P. vulgaris</i> est utilisé comme femelle et lorsque les génotypes sont primitifs.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	AUCUNE
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	OUI La production de semences est réalisée dans des zones non contaminées par les maladies bactériennes (graisses) pour permettre une production de semences saines (c’est le cas surtout aux États-Unis).
Haploïdisation	AUCUNE Le haricot, comme les autres légumineuses à grosses graines, est très récalcitrant à cette technologie.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	ESSAIS Il existe des stérilités mâles nucléaires et nucléo-cytoplasmiques chez <i>P. vulgaris</i> . Mais, celles-ci n'ont pu être exploitées jusqu'à présent en raison du faible taux de multiplication de l'espèce.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Il existe des cartes génétiques assez complètes et de nombreux marqueurs moléculaires sont disponibles. Des marqueurs de gènes d'intérêt ont été identifiés (différents gènes de résistance à l'anthracnose et le gène <i>I</i> d'hypersensibilité au virus I).

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection généalogique, classiquement. Filiation monograine (SSD). Sélection récurrente, optimisée pour une espèce autogame, avec intégration de diverses méthodes de sélection, dans le cas du haricot grain.
Types variétaux	Variété générique. C'est-à-dire un ensemble de génotypes ayant des caractéristiques agronomiques communes. Lignée pure. C'est le cas de la quasi-totalité des variétés modernes. ESSAIS Hybride F₁. Les semences de haricot nain sont déjà très coûteuses (1/5 du revenu brut/ha), ce qui bloque le développement de ce type variétal. La réalisation d'hybrides pourrait être éventuellement envisagée pour le haricot à rames pour la culture sous abri.

Perspectives d'amélioration

L'avenir du haricot grain est soumis à sa rentabilité chez l'agriculteur et donc aux fluctuations économiques (en particulier, le cours du dollar) puisque pratiquement tous les haricots grains pour l'appertisation proviennent d'importation. Cependant, quelques productions locales visant des créneaux de haute gamme tendent à se développer.

La culture du haricot vert se maintient grâce à la mécanisation (main-d'œuvre trop coûteuse en France pour une récolte manuelle) et à sa transformation industrielle. La quantité transformée reste stable mais elle pourra peut-être se développer avec l'ouverture du marché européen.

Caractères à améliorer

Résistance aux maladies. Il reste des problèmes de maladies à résoudre, notamment celui de la fusariose. Le problème est complexe puisque, au moins, trois parasites telluriques interviennent.

Rendement. Il faudrait aussi augmenter le rendement chez le haricot grain pour encourager la culture de cette plante en France. Le haricot grain est, en effet, couramment importé d'Amérique du Sud et du Nord, pour être mis en boîtes et appertisé en France.

Aptitude à la récolte mécanique. La facilité de détacher les gousses de la plante au moment de la récolte du haricot mangetout est un facteur important pour la qualité ultérieure du produit. Il faut éviter les « grappes » (c'est-à-dire plusieurs haricots encore attachés à un fragment de tige) et les tiges que la machine ne peut éliminer. Après expérimentation, il s'avère que le caractère génétique « facile à cueillir » (*easy pick*) ne permet pas encore de répondre à cette demande.

Qualité de la gousse. Une gousse jeune est forcément fine, mais une gousse fine n'est pas forcément jeune. La finesse de la gousse était un marqueur de jeunesse et un facteur de qualité, mais en recherchant une gousse de plus en plus fine, on a détruit la corrélation entre les deux caractères : la gousse fine peut être vieille. Il faut donc veiller à ce qu'une très grande finesse de gousse soit toujours synonyme d'excellente qualité.

Techniques à développer

Les marqueurs moléculaires, qui sont, dès à présent, utilisés pour suivre des caractères au cours du processus de sélection pourraient aussi apporter une aide à la distinction morphologique.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés de haricot.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 273 variétés de haricot nain et 37 variétés de haricot à rames étaient inscrites au catalogue officiel français et 1 009 variétés de haricot au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Il y avait, cette même année, 8 variétés de haricot nain et 8 variétés de haricot à rames inscrites sur le registre des variétés anciennes pour jardiniers amateurs. Environ 40 nouvelles variétés sont inscrites chaque année en France. Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves réalisées par le GEVES, 65 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV (16 sont des caractères nationaux). La durée minimale d'examen est de 2 cycles de culture. Les observations sont effectuées sur un lieu. À l'issue de ces 2 cycles d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre du contrôle des semences standards ou certifiées. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

Site internet des ressources génétiques du haricot à l'INRA : <http://www.inra.fr/legumineuses/>

Adam-Blondon A.-F., Seignac F., Dron M. et Bannerot H., 1994. A genetic map of common bean to localize specific resistance genes against anthracnose. *Genome*, 37, 915-924.

Bannerot H. et Messiaen C.-M., 2003. Haricots. Dans : *Histoires de légumes, des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 362-375.

Chaux C. et Foury C., 1994. Haricot. Dans : *Productions légumières*, Éditions Tec & Doc Lavoisier, Paris, 3, 75-142.

Fouilloux G., 1976. L'anthracnose du haricot (*Colletotrichum lindemuthianum*) : nouvelles sources de résistance et nouvelles races physiologiques. *Ann. Amélior. Plant.*, 26 (3), 443-445.

Fouilloux G. et Bannerot H., 1988. Selection methods in the common bean (*Phaseolus vulgaris*). Dans : *Genetic resources of Phaseolus vulgaris*. P. Gepts, éd., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Boston, London, 503-542.

Fouilloux G. et Bannerot H., 1992. Le haricot. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 392-405.

Freyre R., Skroch P., Geffroy V., Adam-Blondon A.-F., Shirmohamadali A., Johnson W.C., Llaca V., Noodari R.O., Pereira P.A., Tsai S.M., Tohme J., Dron M., Nienhuis J., Vallejos C.E. et Gepts P., 1998. Towards an integrated linkage map of common bean. 4. Development of a core linkage map and alignment of RFLP maps. *Theor. Appl. Genet.*, 96, 494-502.

Geffroy V., Seignac M., De Oliveira J., Fouilloux G., Skroch P., Thoquet P., Gepts P., Langin T. et Dron M., 2000. Inheritance of partial resistance against *Colletotrichum lindemuthianum* in *Phaseolus vulgaris* and co-localization of quantitative trait loci with genes involved in specific resistance. *MPMI*, 13 (3), 287-296.

Gepts P., 1988. Selection methods in the common bean (*Phaseolus vulgaris*). Dans : *Genetic resources of Phaseolus beans*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Boston, London, 503-542.

Gepts P., 1998. Origin and evolution of common bean : past events and recent trends. *Hortscience*, 37, 1124-1130.

GEVES, 1983. *Description et essai de classification des variétés de haricot nain, inscrites au catalogue officiel français et bénéficiant d'un certificat d'obtention végétale au 30/11/81*. INRA Éditions, Paris, 232 p.

Hopquin B., 1999. Le haricot vert. Dans : *Technologie des légumes*. Y. Tirilly et C.M. Bourgeois, éd., Éditions Tec & Doc Lavoisier, Paris, 130-141.

Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R., 1991. Maladies du haricot (*Phaseolus vulgaris*) et d'autres Phaséolinées. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 261-289.

Pitrat M., 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.

Silbernagel M.J. et Zaumeyer W.J., 1973. Beans. Dans : *Breeding plants for disease resistance, concepts and applications*. R.R. Nelson, éd., The Pennsylvania State University Press, Univ. Park and London, 253-269.

L'hévéa ou arbre à caoutchouc

Hevea brasiliensis (Wild. ex A. Juss) Müller-Argoviensis ($2n = 2x = 36$)
(Euphorbiacées)

Présentation de l'espèce

L'arbre à caoutchouc (hévéa), *Hevea brasiliensis* (Wild. ex A. Juss) Müller-Argoviensis, est une Euphorbiacée originaire d'Amazonie (« arbre du Para »). Déjà connu des Mayas, il est mentionné pour la première fois en Europe au XVI^e siècle. Sa première description est faite par C.M. de La Condamine dans une note à l'Académie des Sciences en 1736, après son voyage en Amazonie. Le genre *Hevea* Aubl. figure dans *La Flore de Guyane* publiée par Fusée Aublet en 1764. R.E. Schultes a fourni en 1990 la synthèse taxonomique la plus actuelle du genre *Hevea* représenté par dix espèces.

Ce n'est qu'après la découverte de la vulcanisation par C. Goodyear en 1839 que le caoutchouc commence à connaître un développement industriel. En 1876, l'Anglais Sir H. Wickham rapporte du Brésil 70 000 graines d'*Hevea brasiliensis*. Ces graines sont semées au jardin botanique de Kew à Londres ; 2 800 d'entre elles germent, et les jeunes plantules sont expédiées à Ceylan (aujourd'hui Sri Lanka) et à Singapour, et sont à l'origine de la culture de l'hévéa en Extrême-Orient. À la fin du XIX^e siècle, le rendement ne dépassait pas 400 kg/ha/an. À partir de 1900, l'hévéa a commencé à être amélioré par sélection massale. Les techniques de greffage ont été mises au point en 1917, ce qui a permis de multiplier végétativement les arbres, puis de cloner les plus performants. Les « clones de greffe » constituent le type variétal prédominant puisqu'ils représentent maintenant 85 % des surfaces cultivées ; les dernières grandes zones encore cultivées sous forme de graines (*seedlings*) sont en Indonésie (Sumatra).

Bien qu'il existe plus de 7 500 espèces à latex synthétisant du caoutchouc, l'espèce *Hevea brasiliensis* est pratiquement la seule exploitée actuellement pour assurer la production mondiale de caoutchouc naturel. L'hévéa est un arbre monoïque et allogame. Les croisements manuels entre *H. brasiliensis* et d'autres espèces telles que *H. benthamiana* Müll. Arg., *H. pauciflora* (Spruce ex Benth) Müll. Arg. ou *H. spruceana* (Benth) Müll. Arg. sont relativement faciles à

réaliser, ce qui laisse supposer que ces croisements peuvent avoir lieu dans la nature. Cependant, l'analyse du matériel génétique issu de la prospection internationale de l'*International Rubber Research and Development Board* (IRRDB) en 1981, réalisée grâce à différents marqueurs génétiques (isozymes et marqueurs moléculaires), n'a pas permis de mettre en évidence d'autres allèles que ceux de la seule espèce *H. brasiliensis*, ce qui indique que les croisements interspécifiques naturels restent exceptionnels.

Les différents organismes de recherche concernés par l'amélioration génétique de l'hévéa coopèrent au sein de l'IRRDB. Cet organisme international a réalisé en 1981 une grande prospection de ressources génétiques au Brésil pour l'espèce *H. brasiliensis*. Le matériel collecté a ensuite été placé dans deux centres de conservation, l'un en Côte d'Ivoire (2 500 génotypes) et l'autre en Malaisie (9 700 génotypes). Le CIRAD, quant à lui, entretient une collection d'environ 800 génotypes en Guyane. En 1995, une prospection malaise au Brésil a permis de récolter du matériel génétique des 9 autres espèces du genre *Hevea*.

Production et utilisation

Le produit prédominant de l'hévéaculture est le caoutchouc naturel issu du séchage du latex. Le latex, porteur des particules de caoutchouc en suspension colloïdale, correspond biologiquement au cytoplasme des cellules laticifères différenciées dans l'écorce du tronc saigné et dans toutes les parties corticales de l'arbre. Par une incision périodique de l'écorce (« saignée »), on obtient l'écoulement du latex qui contient 30 à 40 % de caoutchouc (polyisoprène). La coagulation et le séchage à l'air du latex permettent d'obtenir le caoutchouc aux propriétés si remarquables. La vulcanisation (liaison des chaînes de polyisoprène entre elles) assure la durabilité des propriétés mécaniques et élastiques du caoutchouc. Après 15 à 25 années de saignée, l'abattage des parcelles donne lieu à l'exploitation du bois d'hévéa dont l'importance économique augmente en Asie. L'hévéaculture est née d'investissements spéculatifs sous la forme de grandes plantations industrielles ; elle est progressivement devenue une composante des systèmes de production de petites plantations familiales, pour plus de 80 % des surfaces.

Depuis 2002, un important redressement des cours a relancé la production de caoutchouc naturel. Selon le Groupe international d'études des pays producteurs de caoutchouc (*International Rubber Study Group*, IRSG), la production mondiale de caoutchouc naturel a été de 8,4 millions de tonnes en 2004. 92 % de la production est réalisée en Asie (principalement Thaïlande, Indonésie, Malaisie, Inde, Chine, Viêt-Nam), 6 % en Afrique (Liberia, Côte d'Ivoire, Nigeria, Cameroun, Gabon), et 2 % en Amérique latine (Brésil, Guatemala). Malgré la concurrence du caoutchouc synthétique, le caoutchouc naturel conserve de façon stable une part de 30 à 40 % de la consommation totale de caoutchouc depuis 1950.

Les principaux utilisateurs du caoutchouc naturel sont l'industrie du pneumatique pour 70 %, et celle des produits à base de latex (gants médicaux, préservatifs, etc.) pour 12 %. Ses propriétés le rendent indispensable dans de nombreuses autres applications industrielles (joints, chaussures, industries textile et électrique, jouets). Le caoutchouc naturel et le bois d'hévéa sont des agromatériaux renouvelables. La production du caoutchouc naturel présente un écobilan très supérieur à celui du caoutchouc synthétique en termes de consommation de carbone fossile. Mais, le principal enjeu dans ce domaine réside dans l'aptitude du caoutchouc à réduire la résistance au roulement des pneumatiques, et donc dans son effet sur la consommation de carburant des véhicules. L'utilisation du bois d'hévéa contribue à réduire la pression sur les forêts naturelles. Bien que rentable seulement dans les contextes de main-d'œuvre à bas coût, l'hévéaculture est une activité fortement créatrice d'emplois agricoles et industriels dans les pays producteurs du Sud.

Histoire des variétés cultivées dans le monde

On peut citer quelques grands clones et quelques séries qui marquent l'histoire de l'hévéaculture, avec leur année approximative d'obtention :

1930, '**GT1**' (Indonésie), clone primaire qui occupe encore la seconde place des clones les plus cultivés dans le monde. Il est pourtant un peu dépassé en productivité et est très sensible à une maladie du feuillage due au champignon *Colletotrichum gloeosporioides*.

1930, '**PR107**' (Indonésie), clone primaire qui a une productivité exceptionnelle au-delà de 15 années de saignée. Mais, il présente une croissance et une montée en production très lentes. Ces défauts font que ce clone, encore présent, est de moins en moins planté.

1940, '**RRIM600**' (RRIM-MRB, Malaisie), clone issu du croisement 'TJIR1' × 'PR107', qui est le plus cultivé dans le monde. Il a une excellente productivité en caoutchouc, probablement liée à son architecture très ramifiée qui lui assure un houppier très dense. Il a été moins utilisé en Afrique en raison d'une sensibilité précoce aux dommages dus au vent, qui provoquent des cassures de branches et du tronc.

1950, '**AVROS 2037**' (Indonésie), clone issu du croisement 'AVROS256' × 'AVROS352'. Il a une croissance rapide avant la mise en saignée et une défoliation précoce qui lui permet d'éviter des maladies de feuilles telles que celle provoquée par *Colletotrichum gloeosporioides*. Sa productivité est limitée et ce clone n'est pratiquement plus planté aujourd'hui.

1950, '**RRII 105**' (RRII, Inde), clone issu du croisement 'TJIR1' × 'GL1'. Il est utilisé par 80 % de l'hévéaculture indienne ; c'est le représentant le plus connu de la série 'RRII'.

1955, '**PB217**' (Prang Besar, Malaisie), clone issu du croisement 'PB5/51' × 'PB6/9'. Il se distingue par une très bonne réponse à la stimulation (induction

de la saignée par des traitements avec des substances dégageant de l'éthylène), lui permettant d'atteindre une excellente productivité à moyen et long termes.

1955, '**PB235**' (Prang Besar, Malaisie), clone issu du croisement 'PB5/51' × 'PBS/78'. Il se distingue par une croissance avant saignée et une montée en production exceptionnelles. Il est néanmoins handicapé par une forte sensibilité à l'encoche sèche (affection physiologique réversible occasionnée par une sur-exploitation et se caractérisant par un arrêt de l'écoulement du latex) et une grande fragilité au vent. Son architecture et la forme de sa grume lui donnent un intérêt particulier pour la valorisation de son bois.

1960, '**PB260**' (Prang Besar, Malaisie), clone issu du croisement 'PB5/51' × 'PB49'. Il est assez similaire à 'PB235', mais il possède en outre une bonne résistance à *Colletotrichum gloeosporioides*. Il est adapté à la valorisation de la grume en bois. Le CIRAD maîtrise l'embryogenèse somatique de ce clone.

1960, '**RRIC100**' (RRISL, Sri Lanka), clone issu du croisement 'RRIC52' × 'PB86'. Il présente en champ, en plus d'une croissance rapide avant la mise en production, une bonne résistance aux maladies foliaires telles que celles induites par *Colletotrichum gloeosporioides* et par *Corynespora cassiicola*.

1980, série '**IRCA**' issue de la coopération franco-ivoirienne (sélection CNRA-CIRAD réalisée en Côte d'Ivoire entre 1974 et 1990), dont '**IRCA18**', '**IRCA41**', '**IRCA109**', '**IRCA145**', '**IRCA230**', '**IRCA317**', et '**IRCA331**'. Ces clones sont compétitifs vis-à-vis des meilleurs clones existants et contribuent à la diversification des variétés.

1990, séries '**RRIM900**' et '**RRIM2000**' (RRIM-MRB, Malaisie), clones dont plusieurs sont promus comme spécifiquement sélectionnés pour des aptitudes complémentaires de production de latex et de bois (*latex-timber dual purpose clones*). Cette approche de la sélection tend aujourd'hui à se généraliser.

Il faut mentionner aussi les séries '**RRIV**' au Viêt-Nam, '**IR**' en Indonésie, '**SCATC**' en Chine et **RRIT** en Thaïlande.

Remarque. La variabilité cultivée dans le monde est assez faible, car réduite à la population issue des premières introductions en Asie du matériel collecté par Wickham (population domestiquée 'Wickham'). De plus, certains pays ont planté un nombre très restreint de clones, avec parfois un seul clone prédominant ('RRII105' en Inde, 'RRIM600' en Thaïlande, 'GT1' à Kalimantan en Indonésie).

Le paradoxe de l'hévéa est qu'il est difficilement cultivable dans son aire d'origine du fait de la présence de la maladie sud-américaine des feuilles (*South american leaf blight*, SALB) due à un champignon, *Microcyclus ulei*. À l'exception de quelques rares zones climatiques défavorables à celui-ci, où on peut cultiver des clones 'Wickham' très sensibles à cette maladie, les clones cultivés en Amérique latine sont des hybrides Wickham × Amazonien ('FX', 'IAN', 'FDR', 'FDX', etc.).

Regard sur 50 ans de sélection

Après les premiers travaux de sélection réalisés en Indonésie à partir de 1910, la Malaisie a dominé l'amélioration génétique de l'hévéa avec le programme du *Rubber Research Institute of Malaysia* (RRIM), et surtout avec le programme privé de Prang Besar qui a produit la plupart des grands clones anciens et actuels ('PB49', 'PB86', 'PB5/51', 'PB217', 'PB235', 'PB260'). Les instituts français ont d'abord conduit des recherches au Viêt-Nam et au Cambodge dans les années 1930, puis en Côte d'Ivoire à partir de 1954 où l'Institut de recherche sur le caoutchouc en Afrique (IRCA) a été fondé.

Plusieurs programmes ont tenté, au Brésil et au Guatemala, de créer des clones productifs et résistants à la maladie sud-américaine des feuilles (Ford, Firestone, *Instituto Agrícola do Campinas* ou IAC et *Instituto Agrícola do Norte* ou IAN). Cet objectif est actuellement poursuivi par le programme CIRAD-Michelin-Brésil (CMB).

Le développement de l'hévéaculture en Asie a d'abord utilisé les semences tout-venant (*seedlings*) issues des premiers arbres plantés. Puis, les semences des arbres les plus productifs ont été préférentiellement utilisées. Les arbres issus de sélection massale ont ensuite été clonés par greffage, devenant ainsi les premiers clones, dits « primaires » car non issus de recombinaison génétique contrôlée. Les obtenteurs ont tenté de diffuser des variétés-semences améliorées sous la forme de familles de pleins-frères obtenues à coût élevé par pollinisation manuelle. Enfin, les arbres issus de recombinaison (pollinisation naturelle en vergers à graines, mais surtout pollinisation manuelle) ont été clonés et multipliés par greffage. Des replantations massives ont été planifiées et mises en œuvre avec succès pour permettre le passage de la forme *seedling* à la forme « clone de greffe », d'abord en Malaisie dans les années 1950, puis en Thaïlande dans les années 1960-1990. Cette reconversion reste à faire en grande partie en Indonésie.

Le greffage a rapidement conduit les sélectionneurs à pratiquer une identification individuelle précoce des arbres élités au sein des familles de pleins-frères, obtenues par pollinisation manuelle. Cette facilité s'est accompagnée de taux de sélection trop sévères au stade précoce, d'une évaluation insuffisante des valeurs familiales, et d'une exploitation faible des méthodes de génétique quantitative. Il est vrai que les contraintes biologiques liées à la pollinisation manuelle rendent difficile la construction de plans de croisement efficaces. La faible fertilité chez l'hévéa a fortement restreint le choix des géniteurs femelles, conduisant aujourd'hui à d'importants apparentements entre les meilleurs clones.

Les efforts financiers et humains engagés pour l'amélioration de l'hévéa restent modestes et peu coordonnés au niveau international, notamment du fait qu'il n'y a pas de commerce rentable de variétés ou de semences.

Caractères importants améliorés

Rendement en latex. À la fin du XIX^e siècle, le rendement annuel ne dépassait pas 400 kg/ha. En 1950, les meilleures variétés de semis avaient un rendement annuel de 1 200 kg/ha tandis que celui des clones de greffe actuels atteint 2 500 kg/ha. Cette amélioration du rendement passe non seulement par l'optimisation du fonctionnement écophysologique de l'arbre, mais aussi par l'amélioration de la durabilité du peuplement, conditionnée par la résistance aux dommages dus au vent, et par la résistance aux arrêts de saignée liés aux syndromes physiologiques de l'encoche sèche. Cette maladie comporte deux formes très différentes : l'une est l'encoche sèche non nécrotique dite de fatigue d'exploitation, tandis que l'autre est « l'encoche sèche nécrotique, ou nécrose de l'écorce de l'hévéa ».

Croissance avant la mise en saignée. Une croissance rapide permet une entrée en production (mise en saignée) plus précoce. C'est donc un facteur de rentabilité important. La phase de croissance avant la saignée a été abaissée de 7 à 5 ans dans les contextes écologiques favorables. Pour poursuivre l'amélioration de ce caractère sans déséquilibre entre la partie aérienne clonale et vigoureuse et la partie racinaire non sélectionnée, il serait nécessaire de pouvoir multiplier et diffuser des systèmes racinaires clonaux vigoureux, au lieu des porte-greffe actuels issus de graines.

Résistance aux maladies de feuilles. Quelques clones ayant une résistance durable aux maladies du feuillage telles que *Colletotrichum gloeosporioides* et *Corynespora cassiicola*, ont été obtenus. Des clones résistants à *Microcyclus ulei*, champignon responsable de la maladie la plus dangereuse pour l'hévéaculture (cf. encadré ci-dessous) ont aussi été obtenus, mais les niveaux de production restent limités et/ou les résistances ont vite été contournées.

Microcyclus ulei

L'hévéaculture est marquée par l'existence de la maladie sud-américaine des feuilles (*South american leaf blight*, SALB) qui a empêché tout véritable développement de cette culture en Amérique latine et constitue une menace permanente pour l'Asie et l'Afrique. *Microcyclus ulei* est le champignon responsable. Des variétés d'hévéa résistantes ont été obtenues, notamment grâce à des croisements interspécifiques avec *H. benthamiana* et *H. pauciflora*. Le clone 'F4542' de l'espèce *H. benthamiana* a été un géniteur très utilisé. Malheureusement, les résistances introduites ont vite été contournées. Par ailleurs, les clones résistants sont encore trop peu productifs pour une utilisation rentable. Le projet CMB (CIRAD-Michelin-Brésil) vise à préparer une alternative clonale en cas d'introduction accidentelle de la maladie en Asie ou en Afrique.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	ESSAIS Quelques essais de mutagenèse ont été tentés sans succès en Malaisie.
Croisements interspécifiques	OUI Une résistance à <i>Microcyclus ulei</i> est utilisée grâce à des croisements interspécifiques avec le clone 'F4542' d' <i>H. benthamiana</i> . Une résistance à <i>Microcyclus ulei</i> a été introduite grâce à un croisement interspécifique avec la lignée 'PA31' d' <i>H. pauciflora</i> .
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS Les tentatives de doublements du stock chromosomique, en Chine, en Malaisie et au Brésil, n'ont pas conduit à des créations variétales efficaces, notamment du fait de problèmes importants de chimérisme.
Transgénèse	ESSAIS Le CIRAD, la Malaisie et la Chine ont obtenu des plantules transformées. Jusqu'à présent, le nombre de clones répondant aux techniques de transformation génétique est très limité. Les recherches se poursuivent concernant la maîtrise de l'outil de transformation, l'analyse fonctionnelle des gènes introduits et la recherche de gènes d'intérêt utilisables. L'isolement de promoteurs spécifiques de l'hévéa et les travaux de physiologie moléculaire sur le fonctionnement du tissu laticifère offrent des perspectives d'amélioration de la production de l'hévéa par transformation génétique.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI pour les variétés Le greffage a été mis au point en 1917 et s'est véritablement imposé depuis 1950. Les clones de greffe sont conservés et multipliés en jardins à bois de greffe. L'embryogenèse somatique a été mise au point au CIRAD sur le clone 'PB260'. NON pour les porte-greffe Les porte-greffe sont obtenus par semis de graines non sélectionnées, mais si possible issues du clone 'GT1'.
Sélection sanitaire	AUCUNE Cependant, les plants d'hévéa partant d'Amérique latine sont soumis à des quarantaines très strictes afin d'éviter de propager <i>Microcyclus ulei</i> dans le monde entier.
Haploïdisation	OUI En Chine, dans les années 1990, la culture <i>in vitro</i> de microspores isolées a permis d'obtenir plusieurs centaines de plantules à partir desquelles des arbres ayant des caractéristiques agronomiques intéressantes ont été sélectionnés.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	OUI Certaines variétés sont mâles stériles ('GT1').
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Il existe une auto-incompatibilité partielle forte, de type gamétophytique qui limite les effets délétères de la consanguinité.
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs enzymatiques, des RFLP et une large collection de microsatellites sont utilisés en identification clonale et en identification de paternité (contrôle de la légitimité des croisements). Ils offrent la possibilité de reconstituer les origines parentales sur des lots de semences issues de pollinisation naturelle en vergers à graines de parents connus. Ils sont aussi utilisés pour étudier la diversité du matériel génétique et aident à la construction d'une <i>core collection</i> . Une carte génétique saturée a été établie. Des marqueurs (RFLP) de résistance à <i>Microcyclus ulei</i> et des marqueurs (microsatellites) de facteurs physiologiques ont été positionnés. Des études de déséquilibre de liaison ont été menées sur l'ensemble des marqueurs « neutres » de séquences d'ADN non exprimées, avec la perspective de la mise au point de la sélection assistée par marqueurs. Les approches « gènes candidats », le marquage de gènes exprimés (EST, etc.) et la génomique fonctionnelle commencent à se développer.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Pour les variétés clonales de greffe : des pollinisations manuelles sont effectuées afin de réaliser des familles de pleins-frères. La sélection est ensuite réalisée en 3 étapes : – sélection principalement familiale et secondairement individuelle sur les arbres-mères issus de semences (2 000 plants) et clonage d'une centaine d'individus sélectionnés ; – sélection combinée individus × familles en essais à petite échelle à partir de la centaine de clones sélectionnés au préalable, à raison d'une vingtaine d'arbres par clone. Cela conduit à la sélection de 5 à 20 clones ; – ces 5 à 20 clones sont ensuite étudiés à une grande échelle (plusieurs centaines d'arbres par clone), sur une longue durée et sur plusieurs sites pour leurs caractères agronomiques.
Types variétaux	Variété de semis (<i>seedling</i>) issue de « graines tout-venant » ou de verger à graines. Cette structure variétale est désormais abandonnée. Variété clonale. C'est la forme variétale actuelle quasi exclusive (clones de greffe). La partie clonale ne concerne toutefois que la partie aérienne, les porte-greffe étant issus de graines.

Perspectives d'amélioration

L'analyse physiologique du fonctionnement de l'hévéa saigné a produit des résultats importants qui ont été surtout utiles à l'optimisation de la saignée, mais qui ont encore peu profité à la sélection. Il semble nécessaire de développer ce lien entre la génétique et la physiologie.

Dans les projets de création variétale, un véritable enrichissement génétique est possible en utilisant des populations amazoniennes sauvages. Mais, ces popula-

tions portent un fardeau génétique trop lourd en gènes défavorables pour permettre leur utilisation directe. Un travail d'amélioration de ces populations est nécessaire au préalable.

Une autre possibilité est la mise en place de méthodes de type « sélection réciproque » à partir de la population domestiquée 'Wickham', qui, en première approche, est génétiquement homogène. Mais, il conviendrait de la diviser en groupes de géniteurs complémentaires pour permettre une meilleure exploitation de la variabilité génétique.

Caractères à améliorer

Les caractères classiques (productivité en latex, croissance avant la mise en saignée, résistance aux maladies des feuilles) sont toujours pertinents. De nouveaux aspects prennent de l'importance :

Résistance à *Microcyclus ulei*. Le CIRAD accorde une priorité au projet de construction de résistances génétiques durables, qu'il conduit avec Michelin. Pour ce faire, il est envisagé d'intégrer toutes les possibilités offertes par la sélection conventionnelle, par l'exploitation des ressources génétiques amazoniennes, par les techniques de marquage moléculaire et dès que possible par la transgénèse.

Production de latex, puis de bois. Une forte compétition pour les assimilats carbonés existe entre la production de latex et la croissance de l'arbre saigné. Les calculs économiques indiquent qu'il n'est pas rentable de consentir une perte sur la production de latex pour améliorer la production de bois. Dans le cadre de projets intégrant l'ensemble du système de culture à l'échelle de la vie de la parcelle, l'amélioration génétique vise l'augmentation de la production de biomasse et de bois par identification d'idéotypes architecturaux favorables et par le choix de clones maintenant une bonne croissance en cours de saignée. L'interférence avec la résistance au vent est prise en compte.

Taux de saccharose dans les laticifères. Le saccharose dans les laticifères est à la fois source d'énergie métabolique et brique de base dans la synthèse du polyisoprène (caoutchouc naturel). Les différences entre clones pour ce caractère traduisent de fortes différences de fonctionnement métabolique qui influent fortement sur la productivité et sur les techniques de saignée, notamment sur la réponse à l'éthylène, hormone stimulant l'écoulement du latex et sa régénération entre deux saignées.

Techniques à développer

Exploitation des méthodes de génétique quantitative. Cela impose un travail plus important d'évaluation des géniteurs par construction de plans de croisement, malgré les difficultés liées à la faible fertilité femelle de l'hévéa. Cela nécessite également une véritable estimation de la valeur génétique des candidats à la sélection dans le cadre d'une sélection combinée « individus $\times$ familles ».

Marquage génétique moléculaire. Au-delà des résultats déjà acquis (marquage par microsatellites pour l'identification clonale, identification de parenté, études de diversité, cartographie génétique), la sélection assistée par marqueurs au sein de familles performantes à grands effectifs permettrait des tris très précoces efficaces pour la suite de la sélection.

Embryogenèse somatique. Elle pourrait permettre de développer des clones entiers (c'est-à-dire non greffés), ou des clones de porte-greffe (sélection pour le système racinaire) pouvant être combinés à des clones de partie aérienne. Cette méthode, travaillée en France (CIRAD), en Malaisie, en Inde et en Chine, réduirait l'hétérogénéité des porte-greffe actuellement issus de semis.

Transformation génétique. Cet outil, dépendant de l'embryogenèse somatique (pour la régénération en plantules des lignées cellulaires transformées), devrait permettre des améliorations ciblées de clones existants et performants, dans le domaine agronomique (production, résistance aux maladies, qualité du caoutchouc, etc.), ou pour la production par les laticifères de molécules protéiques à extraire et à commercialiser.

Génomique fonctionnelle. Elle permettra d'identifier et de caractériser des gènes d'intérêt, cartographiables et traçables en sélection, ou utilisables en transgénèse.

Protection des variétés

Aucun pays cultivant l'hévéa ne possède de catalogue avec la notion d'autorisation de mise sur le marché. Les centres de recherche des pays producteurs publient des listes de clones recommandés. Il n'existe pas de commerce des clones, mais seulement une production et une vente de plants greffés aux producteurs. Chaque pays producteur autorise la libre circulation interne du matériel végétal de multiplication, mais entretient des restrictions réglementaires à la sortie du pays. Parmi les pays pratiquant l'hévéaculture, seuls la Chine et le Brésil ont récemment adhéré à l'UPOV, mais n'ont pas encore mis en place une procédure de protection par COV des clones d'hévéa. Dans cette perspective, les critères morphologiques de distinction, très peu résolutifs chez l'hévéa, seraient d'une mise en œuvre difficile. Il existe un ensemble de 13 systèmes isoenzymatiques qui pourrait être une aide à la distinction.

Pour en savoir plus

Besse P., Lebrun P., Seguin M. et Lanaud C., 1993. DNA fingerprints in *Hevea brasiliensis* (rubber tree) using human minisatellite probes. *Heredity*, 70 (3), 237-244.

Carron M.-P., Etienne H., Lardet L., Campagna S., Perrin Y., Leconte A. et Chaîne C., 1995. Somatic embryogenesis in rubber (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). *For. Sci.*, 46, 117-136.

Clément-Demange A., Legnate H., Seguin M., Carron M.-P., Le Guen V., Chapuset T. et Nicolas D., 1997. L'hévéa. Dans : *Amélioration des plantes tropicales*. A. Charrier, M. Jacquot, S. Hamon et D. Nicolas, éd., CIRAD-ORSTOM, collection « Repères », Montpellier, 357-381.

- Clément-Demange A., Legnaté H., Seguin M., Boutry M., Leconte A., Luo H., Chapuset, T., Pinard F., Doumbia A., Gobina S. et Koffi K.E., 1997.** STD3 germplasm Hevea. Contrat n° TS3-CT92-0133. Étude et caractérisation de nouvelles ressources génétiques : leur utilisation en amélioration de l'Hévéa. Rapport scientifique final. Volume 1/3 : Document de synthèse. Volume 2/3 : Quatrième et dernière année du projet, décembre 1995-décembre 1996. Volume 3/3 : Annexes. Rapport CP-SIC 769, avril 1997. Résumé (6 p.).
- Compagnon P., 1986.** *Le caoutchouc naturel : biologie, culture, production*. Ed. G.-P. Maisonneuve et Larose, Paris, 595 p.
- Dean W., 1987.** *Brazil and the struggle for rubber. A study in environmental history*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 234 p.
- Dijkman D.J., 1951.** *Hevea : Thirty Years of Research in the Far East*. Coral Gables, University of Miami Press, Miami, 329 p.
- Garcia D., Mattos C., Clément-Demange A. et Le Guen V., 2003.** Genetic parameter estimations of three traits used to evaluate South American Leaf Blight (SALB) in rubber tree. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.*, 2 (3), 449-458.
- Hénon J.-M. et Nicolas D., 1989.** Relation between anatomical characteristics of the laticiferous system and latex yield : search for early selection criteria. Dans : *Physiology of rubber tree latex : the laticiferous cell and latex : a model of cytoplasm*. J. d'Auzac, J.-L. Jacob et H. Chrestin, éd. CRC Press, Boca Raton, 31-49.
- Leconte A., 1983.** *La reproduction sexuée de l'Hevea brasiliensis. Une approche histologique et expérimentale*. Thèse de doctorat de 3^e cycle en sciences agronomiques, université de Montpellier II, Montpellier, 96 p.
- Lekawipat N., Teerawatanasuk K., Rodier-Goud M., Seguin M., Vanachit A., Toojinda T. et Tragoonrung S., 2003.** Genetic diversity analysis of wild germplasm and cultivated clones of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. by using microsatellite markers. *J. Rubb. Res.*, 6 (1), 36-47.
- Lespinasse D., Rodier-Goud M., Grivet L., Leconte A., Legnaté H. et Seguin M., 2000.** A saturated genetic linkage map of rubber tree (*Hevea* spp.) based on RFLP, AFLP, microsatellites, and isosyme markers. *Theor. Appl. Genet.*, 100 (1), 127-138.
- Lespinasse D., Grivet L., Troispoux V., Rodier-Goud M., Pinard F. et Seguin M., 2000.** Identification of QTLs involved in the resistance to South American leaf blight (*Microcyclus ulei*) in the rubber tree. *Theor. Appl. Genet.*, 100 (6), 975-984.
- Montoro P., Rattana W., Pujade-Renaud V., Michaux-Ferriere N., Monkolsook Y., Kanthapura R. et Adunsadthapong S., 2003.** Production of *Hevea brasiliensis* transgenic embryogenic callus lines by *Agrobacterium tumefaciens* : Roles of calcium. *Plant Cell Rep.*, 21, 1095-1102.
- Nicolas D., 1981.** *Prospection et récolte de matériel végétal Hevea dans la forêt amazonienne*. Février-mars 1981. Rapport IRCA.
- Schultes R.E., 1990.** A brief Taxonomic View of the Genus *Hevea*. MRRDB Monograph n° 14, Malaysian Rubber Research and Development Board, Kuala Lumpur, 57 p.
- Seguin M., Flori A., Legnaté H. and Clément-Demange A., 1999.** L'hévéa. Dans : *Diversité génétique des plantes tropicales cultivées*. S. Hamon, M. Seguin, X. Perrier et J.-C. Glaszmann, éd., CIRAD, IRD, collection « Repères », Montpellier, 241-269.
- Sérier J.-B., 1993.** *Histoire du caoutchouc*. Ed. Desjonquères, Paris, 273 p.
- Shepherd R., 1969.** Aspects of *Hevea* breeding and selection. Investigations undertaken on Prang Besar Estate. *RRIM Planters' Bulletin*, 104, 206-216.
- Simmonds N. W., 1989.** Rubber breeding. Dans : *Rubber*. C.C. Webster et W.J. Baulkwill, éd., Longman, Londres, 85-124.
- Tan H., 1987.** Strategies in rubber tree breeding. Dans : *Improving vegetatively propagated crops*. A.J. Abbott et R.K. Atkin, éd., Academic Press, Londres, 27-62.

L'hortensia

Hydrangea macrophylla Sér. subsp. *macrophylla* Mc Clint ($2n = 2x = 36$)
(Hydrangéacées)

Présentation de l'espèce

L'hortensia cultivé appartient à la sous-espèce *macrophylla* Mc Clint de l'espèce *macrophylla* Sér. du genre *Hydrangea* L. À l'état spontané, on trouve cette sous-espèce seulement à basse altitude à l'est du Japon. La forme globuleuse de l'inflorescence est sélectionnée depuis très longtemps au Japon et en Chine. Des plants d'hortensia ont été introduits de Chine en Angleterre en 1789. Cette plante a eu plusieurs noms « Hortense du Japon » (1789), « Rose du Japon » (1821), « Hortensia du Japon » (1821) et « Hydrangelle des jardins » (1892). À la fin du XIX^e siècle il n'y avait probablement pas plus d'une dizaine de types d'hortensia en Europe. La sélection de l'hortensia est très ancienne en Chine et au Japon, alors qu'elle n'a débuté qu'au XX^e siècle en Europe. Depuis, des centaines de variétés ont été produites, particulièrement dans la première partie du XX^e siècle.

L'hortensia est une plante pérenne et allogame, multipliée végétativement par boutures. La France possède des collections publiques et privées. Le réseau de ressources génétiques du genre *Hydrangea* constitué sous l'égide du BRG rassemble 5 conservateurs et est coordonné par l'INH (Angers, Maine-et-Loire).

Production et utilisation

L'hortensia *sensu stricto*, c'est-à-dire *Hydrangea macrophylla* Sér. subsp. *macrophylla* Mc Clint, est un arbuste à fleurs groupées en inflorescences complexes corymbiformes. Les inflorescences sont composées de fleurs de 2 types : les unes sont fertiles et les autres se distinguent par de grands sépales et sont dites stériles bien que le pollen soit fertile.

La France produit 4,4 millions de plants d'hortensia en phase végétative sur les 16,2 millions produits en Europe. La moitié des plantes françaises est exportée

en Europe pour le forçage. Parmi les 2,2 millions restants, 80 % sont forcés par des horticulteurs non spécialisés (données 2001).

L'hortensia a trois utilisations principales, le produit vendu étant, soit la plante entière, soit une branche fleurie :

- la potée fleurie. Elle est destinée à la décoration intérieure en Europe du Nord : elle doit donc être de faible volume (3-4 branches) et de prix peu élevé, tandis qu'en Europe du Sud elle est considérée comme une plante de cérémonie : elle doit alors comporter 8 à 10 branches et son prix peut être élevé ;
- l'arbuste ornemental. L'hortensia est un arbuste dont la floraison abondante présente un attrait indéniable pour la décoration estivale des jardins, mais en sols acides ;
- la fleur coupée. L'hortensia est utilisé dans la composition de bouquets frais ou secs. Les variétés destinées à cet usage se distinguent par de grandes tiges. La quantité de fleurs coupées d'hortensia échangées sur les marchés néerlandais en 2003 a été évaluée à 9 millions de têtes.

Historique des variétés cultivées en France

Variétés anciennes introduites ou créées en Europe

Fin du XVIII^e siècle, '**Joseph Banks**', variété provenant de Chine, à grosses inflorescences globuleuses rose pâle.

Fin du XIX^e siècle, '**Nigra**' (introduite vers 1870), variété provenant du Japon, se distinguant par des tiges noires.

Fin du XIX^e siècle, '**Mariesi**' et '**Veitchii**' (introduites par C. Maries pour les pépinières Veitch, Royaume-Uni en 1879), variétés à inflorescences plates. Les inflorescences de la première sont d'une couleur très pâle tandis que celles de la seconde sont blanches.

Fin du XIX^e siècle, '**Rosea**' (introduite par C. Maries, Royaume-Uni en 1880), variété à inflorescences globuleuses d'une couleur très pâle. Cette variété se distingue aussi par un feuillage de texture fine.

1912, '**Excelsior**' (L. Foucard, France), variété aujourd'hui disparue, issue de l'hybridation interspécifique *H. macrophylla* 'Rosea' × *H. paniculata* Sieb. 'Grandiflora'. Cette variété se distinguait par des inflorescences paniculées rose vif, une bonne vigueur et une bonne résistance au froid.

Vers 1920, '**Domotoi**' (introduite du Japon), variété à inflorescences globuleuses irrégulières et rose pâle, à fleurs doubles et à rameaux fasciés.

1920, *Hydrangea* × *hortensiolaris* (Cayeux, France), hybride issu du croisement interspécifique entre *H. macrophylla* et *H. petiolaris* Sieb. & Zucc. se caractérisant par son caractère grimpant et ses fleurs roses.

1927, '**Merveille**' (Cayeux, France), variété pouvant être considérée comme le précurseur des variétés modernes. Elle se caractérise par la rigidité de ses tiges

qui lui permet de porter des grandes inflorescences sans nécessiter de tuteurage. Cette variété, encore cultivée, produit des inflorescences de couleur rose foncé.

1938, '**Merveille Sanguinea**' (Truffaut, France), variété qui est un mutant spontané de 'Merveille' et qui se distingue par un feuillage pourpre et des inflorescences plus foncées.

1938, '**Amethyst**' (Haworth-Booth, Royaume-Uni), variété se distinguant par ses fleurs doubles à sépales dentés.

Variétés récentes

Vers 1947, '**Sœur Thérèse**' (Gaigne, France), variété à fleurs blanches toujours très commercialisée en France.

Années 1950, '**Bodensee**' (Brugger, Allemagne), variété produisant de belles inflorescences roses ou bleues, qui est encore cultivée actuellement.

Années 1950, '**Benelux**', variété se distinguant par son état tétraploïde, de belles inflorescences globuleuses roses ou bleues.

1952, '**Hörnli**' (Wädenswil, Suisse), variété naine à très nombreuses tiges et à inflorescences globuleuses pourpres.

Années 1960, '**Ticino**' (Dr. Bosse, Allemagne), variété apte au forçage et à inflorescences de couleur très foncée.

1961, '**Preziosa**' (Ahrends, Allemagne), variété issue du croisement entre deux sous-espèces de *H. macrophylla* (subsp. *macrophylla* et subsp. *serrata* (Thunb.) Makino). Elle connaît un succès commercial comme plante de jardin.

1963, '**Sensation 75**' (Steiniger, Allemagne), variété produisant des inflorescences formées de sépales bicolores rose foncé bordés de blanc.

1964, '**Rosita**' (Draps, Belgique), variété produisant des inflorescences globuleuses roses. C'est la variété de couleur rose vif la plus cultivée actuellement.

1965, '**Hermann Dienemann**' ou '**Leuchtfeuer**' (H. Dienemann, Allemagne), variété produisant des inflorescences globuleuses rose pourpre. Cette variété connaît un grand succès commercial.

1965, '**Marie Claire**' (Dublanquet, France), variété semi-hâtive très vigoureuse produisant de grandes inflorescences globuleuses rose pâle. Les sépales des fleurs stériles sont dentés.

1979, '**Blaumeise**' (Station de Recherches de Wädenswil, Suisse), variété à tiges courtes produisant des inflorescences plates. Celles-ci sont rose vif ou bleues lorsque le sol contient de l'aluminium échangeable. Cette variété est une des plus utilisées parmi les variétés à inflorescences plates pour la réalisation de potées fleuries.

1986, '**Rotschwanz**' (Station de Recherches de Wädenswil, Suisse), variété à inflorescences plates, se distinguant par la belle couleur rouge des fleurs stériles.

1987, **‘Schneeball’** (Nieschultz, Allemagne), variété assez précoce et caractérisée par un feuillage vert foncé. Ses fleurs aux sépales dentés produisent de belles inflorescences globuleuses blanches.

Années 1990, **Japanese ladies®**, nom de marque des variétés japonaises commercialisées en Europe, à fleurs bicolores roses ou bleues bordées de blanc.

Années 1990, introduction en Europe de variétés japonaises à inflorescences plates et à fleurs stériles doubles : **‘Hanabi’** (blanc), **‘Izu-no-Hana’** et **‘Jogasaki’** (rose).

1996, **‘Rama’** (Ramp, Allemagne), variété peu vigoureuse à inflorescences globuleuses d’une très vive couleur rouge.

2000, **‘Sabrina’** (Sidaco, Pays-Bas), variété à inflorescences globuleuses dont les fleurs stériles sont blanches bordées de rose.

2002, **‘Yellowleaf’** (introduite aux États-Unis par Hines Horticulture Inc.), variété japonaise, à inflorescences globuleuses roses. Elle se distingue par un feuillage jaune d’or à jaune vert chartreuse.

Remarque. De nombreuses variétés créées au début du siècle ont disparu. Cependant, des collections permettent de conserver une bonne partie de la variabilité. La variabilité sur laquelle repose la sélection de l’hortensia en Europe est assez étroite car elle est constituée par la dizaine de variétés qui ont été introduites à la fin du XIX^e siècle. Les introductions japonaises de la fin du XX^e siècle vont permettre d’élargir la variabilité.

Regard sur 50 ans de sélection

La sélection de l’hortensia a été pratiquée de longue date au Japon et en Chine. Introduit en Europe à la fin du XVIII^e siècle, il a fallu un siècle pour qu’une véritable amélioration commence. L’élan a été donné par des horticulteurs (ou des jardiniers passionnés) français suivis de ceux des autres pays d’Europe. Une importante sélection de cette espèce s’est produite en France jusque dans les années 1970. L’amélioration de l’hortensia a consisté dans les années 1930 à sélectionner les premières variétés assez robustes pour porter des grosses inflorescences sans tuteurage. Dans les années 1970-1980, des variétés d’une taille plus réduite, du fait d’une moindre vigueur et plus ramifiées naturellement, ont été créées en Suisse et en Allemagne afin de satisfaire le marché de la potée fleurie. Durant ces années également, sont apparues des variétés à inflorescences plates et aux couleurs vives utilisées pour la potée fleurie et l’extérieur. Au cours du XX^e siècle, la sélection s’est attachée à créer des variétés produisant des inflorescences de couleur plus foncée tendant vers le rouge. À la fin du XX^e siècle, l’introduction de variétés japonaises apporte une nouvelle source de diversité : duplication des fleurs stériles, variétés à inflorescences composées de fleurs bicolores blanches bordées de rose et à feuillage pourpre au printemps.

Caractères importants améliorés

Forme des inflorescences. Des variétés produisant des inflorescences globuleuses, de plus en plus serrées et régulières, ont été créées en sélectionnant des plantes contenant de nombreuses fleurs stériles. D'autre part, pour les variétés à inflorescences plates, les axes des inflorescences sont devenus plus courts et plus trapus.

Couleur. Des variétés portant des inflorescences aux couleurs de plus en plus soutenues, en particulier rouge foncé, ont été obtenues. Les sélectionneurs ont aussi créé des plantes produisant des inflorescences bicolores. La diversification de la couleur du feuillage ne concerne que 3 ou 4 variétés qui sont des mutations découvertes dans les cultures. On trouve sur le marché des variétés à feuillage vert foncé, légèrement bordeaux, une variété à feuillage jaune d'or et des variétés à feuillage panaché blanc et vert ou blanc vert et jaune.

Adaptation aux pratiques horticoles. Des plantes cultivables sans tuteur, ramifiant facilement avec ou sans pincement, aptes au forçage, ou bleuissant bien ont été sélectionnées.

Port de la plante. Les sélectionneurs ont obtenu pour la culture en pot des variétés plus courtes et même des variétés naines, alors que les variétés à grand développement restent intéressantes pour les jardins.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI Elles sont fréquentes : – dès 1848, feuillage panaché ; – en 1870, sépales dentés et duplication des fleurs ('Madame Mézard') ; – en 1900, tige noire ('Jeanne d'Arc', mutation de 'Thomas Hogg') ; – en 1938, coloration rouge foncé du feuillage ('Merveille Sanguinea', mutation de 'Merveille') ; – de 1937 à 1939, couleur blanche de l'inflorescence ('Touraine', 'Madame Jules Busson') ; – forme globuleuse de l'inflorescence ('Holibel', mutation de 'Libelle' et 'Bela', mutation de 'Blaumaise').
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	OUI Le croisement entre la variété 'Rosea' et <i>H. paniculata</i> 'Grandiflora' a été pratiqué dès 1912 ('Excelsior'). Le croisement entre <i>H. macrophylla</i> et <i>H. petiolaris</i> a généré un hortensia grimpant à fleurs roses (<i>H. × hortensiolaris</i> , 1920).
Hybridation somatique	AUCUNE

suite...

... suite

Élévation du niveau de ploïdie	OUI La plupart des variétés sont diploïdes. Environ 12 % des variétés sont triploïdes en raison de la formation de gamètes non réduits. Le pourcentage élevé de variétés triploïdes par rapport à la faible fréquence d'apparition de gamètes non réduits est une preuve de l'intérêt horticole de la triploïdie. Il existe, au moins, une variété tétraploïde ('Benelux').
Transgénèse	AUCUNE

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplification végétative	OUI L'hortensia est toujours commercialisé sous forme clonale. Il est multiplié par boutures.
Sélection sanitaire	OUI La culture de méristèmes <i>in vitro</i> est au point. Cette technique permet de commencer un programme de sélection avec du matériel sain.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Les espèces du genre <i>Hydrangea</i> sont auto-incompatibles.
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires et biochimiques sont utilisés pour la détection des doublons dans les collections et pour la structuration de la diversité.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Hybridations entre clones, puis sélection dans la descendance sur le phénotype, puis clonage pour maintenir le type et multiplication végétative.
Types variétaux	Variété clonale issue d'hybridation et multipliée végétativement.

Perspectives d'amélioration

Il n'y a plus en France, de programme de sélection sur l'hortensia (c'est-à-dire *Hydrangea macrophylla* subsp. *macrophylla*). Par contre, un programme d'amélioration des espèces du genre *Hydrangea* autre que l'hortensia, a été récemment engagé. SAPHINOV (groupement d'intérêt économique qui rassemble un groupe de pépiniéristes) s'est, en effet, associé à l'INRA afin de sélectionner des hybrides destinés aux jardins. Ce programme, conduit à l'INRA, concerne les espèces *H. paniculata*, *H. petiolaris* et *H. macrophylla*.

Caractères importants à améliorer

Diversification. Des progrès peuvent être encore réalisés pour obtenir des fleurs de couleur plus intense. L'introduction de nouvelles couleurs passera par une meilleure exploitation de la diversité naturelle.

Protection des variétés en France

Dans le cas d'*Hydrangea*, comme pour l'ensemble des plantes ornementales, il n'existe pas de catalogue officiel des variétés. Par contre, il est possible de protéger ces variétés par COV. En France, il y a actuellement 3 variétés d'*Hydrangea* dont 2 d'hortensia (*H. macrophylla* subsp. *macrophylla*), protégées par COV. De nombreuses variétés allemandes ou suisses sont protégées par COV européen.

La création de la collection de référence d'hortensia utilisée pour les examens DHS a été réalisée en plusieurs étapes. La première a consisté, à partir de 1978, à rassembler la quantité la plus importante possible de matériel végétal auprès de pépiniéristes, horticulteurs, collectionneurs privés et jardins botaniques. La seconde étape a été de définir des critères de distinction objectifs permettant d'identifier et de distinguer les variétés. Cette étape est particulièrement délicate du fait de l'absence de catalogue, les dénominations des variétés étant parfois assez fantaisistes et leurs descriptions succinctes. Cette collection est implantée dans un arboretum de la ville d'Angers sous la coordination de l'INH à Angers (Maine-et-Loire). Plus de 350 variétés cultivées de *H. macrophylla* subsp. *macrophylla* sont conservées dans cette collection.

Un autre problème intrinsèque de l'hortensia est que les caractères morphologiques polymorphes sont peu nombreux et quelques-uns d'entre eux sont peu fiables, car ils varient en fonction des conditions environnementales.

350 variétés d'hortensia, décrites par 35 critères de distinction, composent la collection de référence. L'usage des marqueurs moléculaires permet de résoudre des problèmes ponctuels, mais ceux-ci n'entrent pas dans les critères proprement dits de distinction.

La responsabilité internationale de l'enregistrement des noms de variétés cultivées (ICRA) a été confié à l'INH par la SIHS (ou ISHS) pour que les noms de variétés cultivées soient conformes au code international de nomenclature des plantes cultivées.

Pour en savoir plus

Bertrand H., 1992. Identification of *Hydrangea macrophylla* Ser. cultivars. *Acta Hortic.*, 320, 209-212.

Cerbah M., Mortreau E., Brown S., Silak-Yakovlev S., Bertrand H. et Lambert C., 2001. Genome size variation and species relationships in the genus *Hydrangea*. *Theor. Appl. Genet.*, 103 (1), 45-51.

Cousin M.-T., Sharma A.-K., Rousseau J., Poitevin J.-P. et Savoure A., 1986. *Hydrangea* virescence. I. Description of the disease and its transmission to the differential host plant *Catharanthus roseus* by *Cuscuta subinclusa*. *Agron. Sci. Prod. Veg.*, 6 (3), 249-254.

Bertrand H., 2002. Le genre *Hydrangea*. Dans : *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. V. Guérin, INRA Éditions, Paris, 7-34.

Bertrand H. et Lambert C., 2002. Ressources génétiques : conservation et caractérisation. Dans : *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. V. Guérin, INRA Éditions, Paris, 35-41.

- Bertrand H. et Lambert C.**, 2002. Historique de la création variétale. Dans : *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. V. Guérin, INRA Éditions, Paris, 42-49.
- Arène L., Cadic A., Bertrand H. et Lambert C.**, 2002. Hybridations interspécifiques. Dans : *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. V. Guérin, INRA Éditions, Paris, 49-51.
- Boccon-Gibod J.**, 2002. Transformation génétique. Dans : *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. V. Guérin, INRA Éditions, Paris, 51-55.
- Guérin V.**, 2002. *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. INRA Éditions, Paris, 160 p.
- Guérin V., Galopin G., Morel P.**, 2002. Particularités du contexte économique. Dans : *Hydrangea : acquisitions nouvelles et applications*. V. Guérin, INRA Éditions, Paris, 59-62.
- Lawson R.-H., Hearon S.-S. et Smith F.-F.**, 1976. Virescence disease in *Hydrangea macrophylla* (florest *Hydrangea*) : graft transmission of the causal agent and symptoms. *Acta Hortic.*, 59, 153-159.
- Reed S.-M.**, 2000. Development of an *in ovulo* embryo culture procedure for hydrangea. *J. Environ. Hortic.*, 18 (1), 34-39.
- Reed S.-M., Riedel G.-L. et Pooler M.-R.**, 2001. Verification and establishment of *Hydrangea macrophylla* 'Kardinal' × *H. paniculata* 'Brussels Lace' interspecific hybrids. *J. Environ. Hortic.*, 19 (2), 85-88.
- Yamamoto T.**, 2002. *Hydrangea macrophylla* named 'Yellowleaf'. *U.S. Pat. Plant*, n° 12 701, 2 p.

La laitue

Lactuca sativa L. ($2n = 2x = 18$)
(Astéracées ou Composées)

Présentation de l'espèce

La laitue (*Lactuca sativa* L.) est sans doute issue du croisement entre *L. serriola* L. et une espèce sauvage aujourd'hui disparue. La laitue est consommée depuis fort longtemps : la Bible mentionne sa consommation. On sait aussi que des laitues à graines ont été cultivées jusqu'à nos jours pour la fabrication d'huile alimentaire par les Égyptiens. À l'époque gréco-romaine, les laitues étaient riches en latex, ce qui explique leur rôle médicinal (narcotique, calmant,...). Ce rôle a été maintenu longtemps, puisqu'aux XVIII^e et XIX^e siècles, des moines avaient sélectionné des types à haute production de latex pour la pharmacopée (le lactucarium, issu de *Lactuca virosa* L.).

Néanmoins, pour favoriser la consommation de ce légume en salade, une sélection pour diminuer la richesse en latex a dû être effectuée. Les Romains étaient de gros consommateurs de laitue pour « préparer l'estomac aux prouesses gastronomiques ». Au Moyen Âge, les Arabes d'Espagne cultivaient une laitue pommée, la « laitue de Cordoue » et une autre nommée « laitue de Séville » dont la description rappelle celle d'une « romaine ». Cette dernière (dont les graines étaient blanches) fut apportée par les Papes venant s'installer à Avignon. Elle fut introduite à Paris à la suite d'un voyage diplomatique d'un ministre de Charles V à Avignon en 1389. Les premiers types « pommés » commencent à être cultivés en France à partir de 1543. Aux XVII^e et XVIII^e siècles, le forçage de la laitue est pratiqué et permet de produire des laitues primeurs. J.-B. de La Quintinie (1626-1688), jardinier de Louis XIV, a eu un rôle déterminant dans la mise au point de cette pratique culturelle. La production s'est encore intensifiée au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, en particulier dans les ceintures vertes des villes.

La laitue est une espèce annuelle, autogame, multipliée par semences. Elle se croise assez facilement avec l'espèce sauvage *L. serriola*. Des croisements spontanés avec *L. saligna* L. ne sont pas impossibles, mais sûrement très rares. Les

laitues pour la production sont ramassées avant la floraison et il y a donc une probabilité faible pour qu'il y ait une pollinisation fortuite des espèces sauvages avoisinantes.

La FAO a recensé plus de 80 pays ayant une production significative de laitue. De très nombreuses variétés, adaptées à des milieux pédoclimatiques et à des habitudes culinaires très diverses, ont été développées au cours des XIX^e et XX^e siècles.

La variabilité de la laitue est conservée au sein d'importantes banques de gènes notamment aux États-Unis (USDA de Salinas et université de Davis, Californie) et aux Pays-Bas (CGN, Wageningen). Une collection spécifique d'espèces sauvages se trouve en Tchéquie (Station des Plantes maraîchères, Olomouc). En France, l'INRA maintient une collection de ressources génétiques (espèces sauvages, variétés anciennes) pour ses programmes de recherche à Avignon (Vaucluse). Une collection composée des variétés créées depuis l'ouverture du catalogue officiel est conservée par le GEVES à Brion (Maine-et-Loire). Des sélectionneurs et des collectionneurs amateurs assurent la conservation d'autres matériels.

Production et utilisation

Le produit récolté, la « pomme », composé de feuilles, est la partie aérienne de la plante au stade végétatif.

La production mondiale de laitue atteint presque 22 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine (10 millions de tonnes), les États-Unis (5 millions de tonnes), l'Espagne (1 million de tonnes) et l'Italie (0,83 million de tonnes). La France a aussi une production importante avec 0,46 million de tonnes (données FAO, 2004).

En France, la laitue est un légume essentiellement consommé en frais comme salade, soit en l'état, soit sous forme de 4^e gamme (part très minoritaire). En Asie, une part importante de la production est consommée cuite, le produit consommé étant la tige (laitue tige ou celtuce).

Selon la présence ou non d'une pomme, sa forme et la texture et la forme des feuilles, la laitue est classée en plusieurs cultigrupes.

Les laitues pommées

La laitue beurre et la laitue batavia se distinguent par la disposition des nervures (ou nervation), celle de la laitue beurre est « pennée », c'est-à-dire ramifiée sur toute sa longueur tandis que celle de la batavia est flabelliforme, c'est-à-dire que toutes les ramifications partent d'un même point. La laitue romaine et la laitue grasse ont une nervure de type classique.

Laitue beurre. La feuille est tendre, lisse, ondulée ou cloquée. Les feuilles se recouvrent pour former une pomme de densité variable suivant les variétés et les périodes de culture.

Laitue grasse. La laitue grasse se distingue par une feuille épaisse, souvent vert foncé. La pomme formée est généralement assez petite.

Laitue romaine. Le cultigroupe laitue romaine est caractérisé par une feuille oblongue, épaisse, dressée et présentant une importante nervure centrale. La pomme formée est allongée et parfois assez lâche.

Laitue batavia. La feuille est épaisse, craquante et avec une nervure flabelliforme. La pomme formée est aplatie. À ce cultigroupe appartient le type « iceberg » à feuille craquante, dont la pomme très compacte est détachée des feuilles de la « jupe » (c'est-à-dire du tour) et donc souvent vendue sans ces feuilles extérieures.

Les laitues non pommées

Laitue à couper. Le cultigroupe « laitue à couper » est caractérisé par un développement en rosette, permettant initialement la récolte de feuilles indépendantes et en plusieurs fois. Cette pratique reste commune en Italie dans les jardins familiaux. Aujourd'hui, ce cultigroupe est cultivé et a été adapté pour une récolte unique. Il comporte tous les types décrits ci-dessus et, entre autres, le type « feuille de chêne » et le type « *lollo* ».

Laitue tige. Ce cultigroupe primitif de laitue, auquel appartient la laitue-asperge ou celtuce, n'est plus cultivé en France. Dans ce cultigroupe, c'est la tige charnue qui est consommée après cuisson. Il s'est surtout développé en Chine, où certaines variétés forment une tige de gros diamètre, et a été introduit de Chine aux États-Unis.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

XVII^e siècle, '**Gotte**', variété de laitue beurre de pleine terre qui était encore recommandée en 1925 pour les cultures primeurs (en costière ou sous châssis).

1771, '**Feuille de chêne**', variété de laitue à couper commercialisée à l'époque par Vilmorin et qui est encore cultivée en Italie.

1856, '**Blonde maraîchère**', variété de laitue romaine de pleine terre qui a été très cultivée autrefois. Encore inscrite actuellement au catalogue officiel, elle est toujours utilisée par des jardiniers amateurs.

1880, '**Merveille des 4 saisons**', variété de laitue beurre de pleine terre pouvant être cultivée du printemps à l'automne en climat tempéré, qui se distingue par une feuille ondulée et anthocyanée dans sa partie haute. Cette variété, encore inscrite actuellement au catalogue officiel, est toujours utilisée par des jardiniers amateurs.

1883, '**Trocadéro**', variété de laitue beurre de pleine terre encore cultivée par des jardiniers amateurs.

1883, '**Frisée de Beauregard**', synonyme de '**Reine des Glaces**', variété de laitue batavia très résistante à la montée à graines qui est encore utilisée pour les cultures d'été par les jardiniers amateurs.

1887, '**Sucrine**', variété méditerranéenne de laitue romaine de pleine terre encore cultivée au Royaume-Uni.

1854 '**Grosse blonde paresseuse**' et 1917, '**Monstrueuse ronde d'été**', variétés de laitue beurre de pleine terre, se distinguant par une montaison lente. Ce sont les précurseurs des variétés actuelles d'été, résistantes à la montée à graines.

1922, '**Blonde de Paris**', variété de laitue batavia de pleine terre qui a été très cultivée au XX^e siècle.

1926, '**Du bon jardinier**', variété de laitue beurre de pleine terre qui a été très cultivée en France (au nord de la Loire) dans la période 1940-1960. Elle est encore cultivée par les jardiniers amateurs.

1932, '**Rouge grenobloise**', variété de laitue batavia de pleine terre à feuilles brillantes et anthocyanées. Grâce à une bonne résistance au froid, elle peut être cultivée tôt et tard dans l'année. Cette variété ancienne a été très cultivée par les professionnels jusque dans les années 1960 et l'est encore aujourd'hui par les jardiniers amateurs.

Variétés récentes

1964, '**Atlas**' (Van der Ploeg, Pays-Bas), première variété de laitue beurre présentant des caractéristiques favorables à la culture sous serre, c'est-à-dire l'aptitude à la pomaison en jours courts et en conditions de luminosité faible.

1974, '**Averya**' (INRA, France), variété précoce, de printemps, de laitue beurre pouvant être cultivée sous tunnel « chenille ». Cette variété, destinée aux premières plantations de la saison, se caractérise par un volume moyen et une feuille très épaisse.

1975, '**Novir**' (INRA, France), première variété de laitue beurre de plein champ d'été et d'automne tolérante au virus de la mosaïque de la laitue (*Lettuce mosaic virus*, LMV).

1978, '**Capitan**' (S & G Semences, Pays-Bas), première variété de laitue beurre contenant le gène *Dm11* (origine *L. serriola*) de résistance au mildiou ou meunier de la laitue (*Bremia lactucae*).

1980, '**Danilla**' (Vilmorin-Andrieux, France), une des premières variétés de laitue batavia adaptée à la culture sous serre en hiver.

1984, '**Divina**' (Institut de recherche Vilmorin, France), variété de laitue beurre de pleine terre, pour culture d'été. Elle est caractérisée par une pomme volumineuse à feuillage vert foncé et possède le gène *mo1* de tolérance au virus de la mosaïque de la laitue et le gène de résistance *Dm11* à *B. lactucae*. Ce fut la première variété d'été ayant ces caractéristiques. Elle est encore cultivée dans le Sud-Ouest.

1984, '**Mariska**' (Semences Nunhems, Pays-Bas), première variété de laitue beurre de pleine terre possédant le gène *R18* (origine *L. serriola*) de résistance à *B. lactucae*. Cette variété a été peu cultivée, mais a été très utilisée comme géniteur.

1987, '**Ramona**' et '**Judy**' (S & G Semences, Pays-Bas), deux variétés de laitue beurre d'abri se caractérisant par une couleur du feuillage vert foncé et une pomme ouverte évitant les nécroses des feuilles à surmaturité (ce qui permet d'adapter la récolte à la fluctuation de la demande et des prix). Ces variétés ont été très cultivées pendant les années 1990.

1993, '**Samourai**' (Rijk Zwaan, Pays-Bas), variété de laitue beurre d'abri possédant le gène *R18* de résistance à *B. lactucae* (origine *L. serriola*). Cette variété a été très cultivée vers 1995.

1993, '**Ninja**' (S & G Semences, Pays-Bas), première variété de laitue beurre pour culture sous abri possédant le gène *R36* de *L. saligna* qui confère une résistance à *B. lactucae*. Cette variété a été très cultivée en Italie de 1995 à 1998.

1997, '**Cardinale**' (Graines Gautier, France), variété de laitue romaine de pleine terre alliant tolérance au virus de la mosaïque de la laitue et caractères agronomiques intéressants (lenteur de la montée à graines). Grâce à cette variété, il est devenu possible de cultiver toute l'année des laitues de type « rougette » (laitue grasse anthocyanée).

1997, '**Dynamite**' (Semences Nunhems, Pays-Bas), variété de laitue beurre de pleine terre possédant le gène *Nr* (origine *L. virosa* L.) de résistance au puceron *Nasonovia ribisnigri*.

1998, '**Argelès**' (Vilmorin, France), variété de batavia d'abri possédant le gène *R38* de résistance à *Bremia lactucae* (origine *L. serriola*).

1999, '**Concorde**' (Rijk Zwaan, Pays-Bas), variété de laitue à couper très anthocyanée du type « Lollo », résistante à la montée à graines (axe de recherche important dans ce type) et résistante à *B. lactucae* (races Bl: 1 à Bl: 16).

Remarque. Il y a de très nombreux types de couleur et de formes dans chaque cultigroupe. Pour faciliter la commercialisation, le produit doit être standardisé, ce qui a entraîné des changements de diversité. Actuellement, la grande majorité des variétés de laitue cultivées par les maraîchers sont des variétés de création récente (moins de 10 ans). Cependant, plusieurs facteurs ont contribué à maintenir la variabilité des variétés anciennes :

- à la demande des consommateurs, d'anciens types variétaux tels que la « laitue grasse » ou « la feuille de chêne », ont été réintroduits après des améliorations (résistance aux parasites, modification de forme et de couleur du feuillage) ;
- les laitues, en particulier certaines variétés anciennes, telles que 'Merveille des 4 saisons' et 'Grosse blonde paresseuse', sont très cultivées par les jardiniers amateurs ;
- lors de la création de variétés récentes (résistantes à *B. lactucae*, par exemple), les caractéristiques des variétés anciennes ont pu être conservées, particulièrement en Italie et en Espagne.

En plus d'avoir su conserver la variabilité des variétés anciennes, la sélection de la laitue a aussi utilisé des variétés exotiques et différentes espèces apparentées. Par exemple, les gènes de résistance au LMV, *mo1*¹ et *mo1*² proviennent respectivement d'une variété cultivée en Argentine et d'une forme primitive de *L. sativa* d'origine égyptienne. De plus, des gènes de résistance aux parasites proviennent de croisements interspécifiques avec *L. serriola*, *L. saligna* ou *L. virosa*. Les variétés modernes de laitue possèdent donc des géniteurs d'origines très variées.

Regard sur 50 ans de sélection

À partir de 1960, le critère majeur de sélection a été l'adaptation aux conditions climatiques et à la culture sous abri, dans le but d'avoir une production régulière toute l'année. Les premières variétés à feuillage blond et fin, utilisées pour la production sous abri, ont rapidement été remplacées par des variétés néerlandaises au feuillage plus épais. La sélection a ensuite produit des variétés à feuillage très épais et vert foncé, encore mieux adaptées à ce type de production. Le développement de la culture sous abri a aussi orienté la sélection vers la création de variétés résistantes à *B. lactucae*. Dès les années 1960, un grand nombre de variétés de laitue beurre contenait déjà un ou deux gènes de résistance à *B. lactucae*. Les progrès dans l'adaptation des variétés aux différentes conditions climatiques et la course pour l'introduction de résistances génétiques à ce champignon (connu pour ses nombreuses races) conduisent à un renouvellement variétal excessivement rapide.

Sur cette espèce, des programmes de recherche conséquents sont menés aux États-Unis, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas, en France et en Israël.

Caractères importants améliorés

Adaptation aux différentes conditions de culture. La sélection a permis de produire des laitues de bonne qualité toute l'année.

Laitue d'abri. Les premières variétés qui ont été cultivées sous serre verre se distinguaient par une croissance rapide et un feuillage fin ('Reine de mai'). Dans les années 1960, le développement de la culture sous serre verre en hiver, notamment aux Pays-Bas, a vu l'apparition de variétés particulièrement bien adaptées aux conditions de faible luminosité. Elles sont issues de croisements entre des variétés déjà cultivées en hiver sous châssis ('Gotte', 'Blackpool',...) de petit volume et à feuillage blond et très fin et des variétés de plein champ. Cette finesse du feuillage s'accompagnait d'une sensibilité à la nécrose foliaire. Il a donc été créé des variétés au feuillage épais ('Averya'). Ces variétés de laitue, cultivées sous serre verre en période de jours courts, ont aussi été sélectionnées pour une bonne activité photosynthétique et un bon comportement aux variations d'hygrométrie et de température qui sévissent dans ces conditions sous

serre. L'évolution des pratiques culturales, comme l'addition de CO₂ de manière à multiplier par 10 la concentration de ce gaz dans l'air, a aussi contribué au succès et au développement des cultures de laitue sous serre. Ce mode de culture, en jours courts avec faible luminosité, a connu cependant une forte régression à cause du déplacement des zones de production sous abri plastique (généralement) vers le sud de l'Europe (France, Italie, Espagne) où la luminosité est supérieure. C'est la culture sous abri froid (antigel) qui s'est développée en France depuis 1975. L'adaptation aux basses températures a été aussi un objectif, ce qui a permis de faire passer les conditions de température de production de plus de 15 °C à l'antigel.

Laitue de plein champ de printemps ou d'automne. Des variétés de laitue capables de croître et de pommer rapidement dans des conditions de températures basses ont été sélectionnées de manière à pouvoir être cultivées précocement au printemps et tardivement en automne.

Laitue de plein champ d'été. Avant les années 1960, les variétés de laitue beurre adaptées à la culture en été étaient peu nombreuses ('Grosse blonde paresseuse', 'Monstrueuse ronde d'été') car trop sensibles à la montaison. Les variétés du type « *Kagraner Sommer* » ont été les premières à être véritablement bien adaptées à la chaleur et à avoir une montaison tardive. Un feuillage épais et vert foncé, ainsi qu'une pomme pas trop dense, qui permet une certaine aération, sont des caractéristiques importantes pour obtenir un bon comportement à la chaleur.

Résistances aux maladies

Mildiou ou meunier de la laitue (*Bremia lactucae*). Ce champignon parasite à développement rapide provoque la détérioration commerciale du produit, voire la destruction totale de la culture. Ses nombreuses races ont contraint les sélectionneurs à rechercher des sources de résistances très diversifiées dans les variétés anciennes et les espèces sauvages (*L. serriola*, *L. saligna*,...). Plus de 20 gènes, dont plus de la moitié provenant de croisements interspécifiques, ont été utilisés à ce jour (cf. encadré p. 376).

Virus de la mosaïque de la laitue (LMV). Ce virus peut bloquer la croissance des plantes. Il sévit surtout en culture de plein champ. L'infection est généralement propagée par des pucerons, mais certaines souches sont aussi transmissibles par la semence. Au cours des années 1960, l'INRA a mis au point un test de dépistage des semences porteuses de virus. De ce fait, la production de semences en conditions contrôlées à l'abri des pucerons et l'application du test ont permis d'éradiquer les foyers primaires. Au cours des années 1970, l'INRA a introduit un gène, *mo1¹*, de tolérance au LMV et de non-transmission de la souche commune par la semence, provenant d'une variété cultivée en Argentine ('Gallega de Invernio'). Les sélectionneurs nord-américains ont préféré introduire le gène *mo1²*, provenant d'un génotype d'origine égyptienne. La plupart des variétés récentes cultivées en plein champ en France possèdent un de ces

Le mildiou

Le mildiou (ou blanc de la laitue, ou bien encore meunier) est une maladie due à un champignon, *Bremia lactucae*, qui se développe à la face inférieure des feuilles de tous les types de laitue. Des conditions humides et une température comprise entre 10 et 14 °C sont très favorables à l'apparition de la maladie. En raison de son mode de reproduction, la dissémination est très rapide dans des conditions favorables, ce qui explique les dégâts très importants causés aux cultures. Les plantes atteintes par le mildiou sont impropres à la commercialisation. La résistance à ce parasite est donc un objectif majeur à atteindre pour les sélectionneurs de laitue. Ce champignon a la faculté de créer rapidement de très nombreuses races surpassant rapidement les résistances monogéniques. Cette situation conduit les sélectionneurs à rechercher constamment de nouveaux gènes conférant la résistance au plus grand nombre possible de races. C'est donc une course entre l'évolution du parasite et l'introduction de nouveaux gènes de résistance. Les chercheurs ont mis en évidence une résistance horizontale (multi-génique) dont l'utilisation pour la création variétale est encore difficile.

Au niveau européen, il existe un observatoire : l'*International Bremia Evaluation Board* (IBEB). Lors de deux ou trois réunions annuelles, obtenteurs et services en charge de l'inscription font le point sur l'évolution du parasite, la caractérisation des nouvelles souches présentes au travers d'hôtes différentiels harmonisés ainsi que l'officialisation de celles-ci, si elles sont d'importance reconnue. Jusqu'à présent, 25 races de *B. lactucae* ont été recensées et identifiées, la plus récente (Bl: 25) datant de mai 2004.

gènes. Avec l'utilisation de semences saines, la résistance n'est pas nécessaire pour la culture sous serre, l'inoculum étant inexistant dans ces conditions.

Pucerons. De nombreux pucerons se développent sur la laitue. Certains attaquent les feuilles et d'autres les racines. Un gène de résistance provenant de *L. virosa*, efficace contre un puceron du feuillage, *Nasonovia ribisnigri*, a été introduit dans des variétés commerciales de plein champ au cours des années 1990.

Conservation au champ. Certaines variétés ont été sélectionnées de manière à ce que les dernières étapes de la pommaison se déroulent lentement et génèrent une pomme moins dense et pas trop fermée. Ce caractère est précieux pour les producteurs qui ont ainsi une certaine latitude dans la date de récolte, pouvant aller jusqu'à une dizaine de jours, surtout sous serre, vis-à-vis de la fluctuation des cours.

Présentation du produit. Les anciennes variétés, à feuillage fin (et par ailleurs vert pâle, « blond »), ont été rejetées par le consommateur à cause du manque de tenue de la feuille qui flétrit rapidement à l'air libre, puis dans le saladier sous l'effet du vinaigre. Ces variétés ont donc été remplacées par d'autres à feuillage épais, beaucoup moins sensible au flétrissement.

Adaptation au transport. Les variétés à pomme dense, qui avaient comme inconvénient de s'échauffer pendant le transport, ont été remplacées, dans une large mesure, par des variétés à pomme plus lâche.

Diversification. La redécouverte dans le cultigroupe « laitue à couper » du type « feuille de chêne » a permis de diversifier considérablement le marché. C'est

ainsi que de nombreuses variétés semi-pommantes et/ou à feuillage anthocyané sont apparues. Par ailleurs, des variétés anciennes ('Lollo rossa', 'Radichetta',...) toujours cultivées en Italie ont été introduites récemment. Devant l'ouverture de ce nouveau marché, les sélectionneurs ont effectué des améliorations en introduisant des résistances au *B. lactucae*, au LMV et à présent aux pucerons. La sélection a ainsi proposé des variétés améliorées tout en conservant les caractéristiques principales des anciennes variétés. Par contre, le consommateur français utilise très peu de salades de type romaine, batavia Iceberg ou laitue grasse. En laitue (tous les types) la variabilité cultivée est, en effet, beaucoup plus importante en Italie qu'en France. Enfin, dans le secteur de la 4^e gamme, les jeunes pousses de salade (ou *baby leaf*) représentent une innovation récente (elles sont apparues en 1995). Le marché haut de gamme de jeunes feuilles entières, où la laitue est souvent associée à d'autres légumes feuilles (roquette cultivée *Eruca sativa* Mill., épinard *Spinacia oleracea* L....), est en plein développement.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation des mutations spontanées	OUI De nombreux gènes de résistance au mildiou d'origine intraspécifique ont été utilisés. <i>mo1¹</i>, <i>mo1²</i>, gènes de tolérance et de non-transmission par la graine du virus de la mosaïque de la laitue. La majorité des variétés récentes cultivées en plein champ, en France, possèdent un de ces gènes.
Mutagenèse induite	ESSAIS en France Des expériences de mutagenèse au MSE ont été réalisées pour créer des plantes albinos pouvant servir de marqueurs dans la perspective d'hybridation somatique. OUI à l'étranger Des variétés naines ont été obtenues aux États-Unis ('Blush', 'Ice cube', 'Mini-green') tandis que des variétés résistantes à la chaleur ont été créées au Japon ('Evergreen', 'Giantgreen').
Croisements interspécifiques	OUI Un grand nombre de gènes de résistance aux maladies provenant de croisements interspécifiques est utilisé pour la création de variétés modernes : – la première variété issue de croisements interspécifiques avec <i>L. virosa</i> a été 'Vanguard', en 1958 ; – <i>Dm5/8</i>, <i>Dm11</i> et <i>R18</i> sont des gènes de résistance au mildiou venant de <i>L. serriola</i> ('Samourai', 'Rosny') ; – la résistance au mildiou venant de <i>L. saligna</i> ('Ninja') ; – la résistance au puceron <i>N. ribisnigri</i> provenant de <i>L. virosa</i> avec <i>L. serriola</i> comme espèce-pont ('Dynamite').
Hybridation somatique	ESSAIS L'hybridation somatique avec <i>L. perennis</i> L. a été tentée afin d'utiliser les résistances de cette espèce impossible à croiser par voie sexuée.

suite...

... suite

Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS Des laitues tétraploïdes ont été créées. Leur état polyploïde a induit des problèmes de développement qui se manifestaient par la présence, dans un même champ, de plantes très polymorphes. Devant ces difficultés, cette voie d'amélioration a été abandonnée. OUI La fertilité de certains hybrides interspécifiques a été restaurée par doublement du stock chromosomique (traitement à la colchicine), mais les plantes issues des rétro-croisements par la laitue cultivée se sont avérées stériles.
Transgénèse	ESSAIS 1^{re} transformation. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce par transformation de protoplastes en 1987. Essais au champ et caractères étudiés. En utilisant <i>Agrobacterium tumefaciens</i>, des plantes transgéniques résistantes à des virus dont le virus de la mosaïque de la laitue (expression du gène viral codant la protéine de la capside), résistantes à des herbicides ou à teneur réduite en nitrates (expression d'un gène de nitrate réductase) ont été produites et plusieurs ont fait l'objet de tests au champ.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Les bourgeons axillaires, prélevés au stade de la pommaison, peuvent être cultivés <i>in vitro</i> de manière à multiplier les plantes élites au cours de la sélection. Une multiplication par bouturage est également possible sur terreau. La régénération de plantes entières de laitue à partir de tissus végétatifs ou même de cultures cellulaires ou de protoplastes est possible mais n'a pas d'application pratique en sélection.
Sélection sanitaire	OUI Le virus de la mosaïque de la laitue (LMV) transmis par la graine a d'abord été combattu par sélection sanitaire lors de la multiplication des semences avec indexage des lots de semences de base et production en zones indemnes de virus et de vecteurs. Aujourd'hui, la conjonction de ces mesures sanitaires, jointes à l'introduction de gènes de tolérance et de non-transmission par la semence et à l'utilisation de l'enrobage des semences, assure la qualité des semences pour les professionnels.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	OUI Des stérilités mâles nucléaires, pour la plupart d'origine spontanée, sont utilisées pour faire du brassage génétique.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Des cartes génétiques saturées sont disponibles. Des marqueurs moléculaires, pour un certain nombre de caractères, en particulier pour des résistances au mildiou et au virus de la mosaïque de la laitue, ont déjà été identifiés grâce notamment à l'utilisation de stratégies de type « analyse de mélanges d'individus en ségrégation ». Ces marqueurs sont utilisés pour assister la sélection depuis le début des années 1990.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Comme pour de nombreuses autres plantes autogames, la sélection généalogique est le principal schéma de sélection utilisé. La sélection pour des caractères moins héritable a conduit certains sélectionneurs à faire de la filiation monograine (SSD).
Types variétaux	OUI Lignée pure. Les variétés actuelles sont de ce type. ESSAIS Hybride F₁. Il y a peut-être un faible effet d'hétérosis, mais celui-ci est trop faible pour justifier l'exploitation de variétés hybrides F₁. De plus, l'efficacité de la pollinisation naturelle ou aidée n'est pas suffisante pour produire des variétés hybrides F₁.

Perspectives d'amélioration

La sélection devra répondre aux évolutions de la culture, qui va vers une production plus économe et plus respectueuse de l'environnement (moins de traitements phytosanitaires ou pour l'agriculture biologique). Les principaux problèmes concernent la résistance aux bio-agresseurs. L'utilisation d'espèces apparentées devrait s'amplifier. Mais, pour lutter contre certaines maladies en culture intensive, face à l'absence de résistance dans les espèces apparentées, le recours à la transformation génétique peut être une voie alternative. Le nombre d'agents pathogènes augmente avec l'émergence de nouvelles maladies, comme certaines bactérioses foliaires. Les progrès dans les interactions hôte-agent pathogène pourront aider à construire des résistances plus stables vis-à-vis du *Bremia*.

La promotion des types à feuille épaisse (craquante) et de la laitue romaine permettrait de renouveler les idéotypes. Le type « iceberg », apprécié aux États-Unis et dans le nord de l'Europe, l'est peu en France et en Italie.

La diversité des types est surtout recherchée en Europe de l'Ouest, particulièrement en Italie, en France et en Espagne et dans les pays plus nordiques tels que l'Allemagne et les Pays-Bas. Cependant, la laitue est très peu appréciée dans les autres pays méditerranéens où des marges de progrès existent donc.

Bien que la laitue soit cultivée dans de nombreux pays, les laboratoires y consacrant des recherches sont peu nombreux. Par contre, une quinzaine d'entreprises privées européennes pratiquent la sélection de la laitue et les techniques de biologie cellulaire et moléculaire sont très utilisées.

Caractères à améliorer

Lutte contre les bio-agresseurs. Il est nécessaire de continuer à introduire des résistances aux bio-agresseurs et en particulier :

– *aux virus*. Certains virus attaquent les cultures de plein champ : le virus de la jaunisse occidentale de la betterave (*Beet western yellow virus*, BWYV) et le virus

de la mosaïque du concombre (*Cucumber mosaic virus*, CMV), tandis que le virus des grosses nervures de la laitue (*Lettuce big vein virus*, LBVV) attaque les cultures sous abri ;

– *aux maladies fongiques*. La poursuite de la recherche de gènes de résistances aux parasites fongiques (*Bremia lactucae*, *Sclerotinia minor* et *Rhizoctonia* sp.,...) est impérative pour limiter les traitements chimiques qui présentent le double inconvénient d'être coûteux et de risquer de laisser des résidus toxiques ;

– *aux bactérioses foliaires*. La recherche de résistances à *Xanthomonas campestris* pv. *vitians* et à *Pseudomonas cichorii* a commencé ;

– *aux pucerons*. Pour certains pucerons du feuillage, tels que *Myzus persicae*, il n'existe actuellement aucune méthode de lutte génétique.

La création de variétés possédant des résistances plus stables aux différents parasites passe par l'identification, la caractérisation et l'utilisation de ressources génétiques (variétés modernes et anciennes, espèces sauvages,...).

Qualité. La laitue est un excellent légume par son faible apport calorique, par sa teneur élevée en sels minéraux et en fibres. Les améliorations qui pourraient être apportées concernent la diminution des résidus éventuels de pesticides en introduisant des résistances aux parasites.

Lutte contre les stress abiotiques. De meilleurs comportements au froid, à la chaleur (faible vitesse de montée à graines) et au manque d'eau doivent être recherchés pour créer des variétés adaptées à de nouveaux bassins de production.

Techniques à développer

Après quelques débuts timides, l'utilisation de marqueurs moléculaires pour introduire ou cumuler des résistances aux parasites devrait s'amplifier. La caractérisation des ressources génétiques, en employant les outils de la génomique (marqueurs moléculaires, SNP, ...), apportera une aide notable aux besoins futurs de l'amélioration.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 388 variétés de laitue étaient inscrites au catalogue officiel français et 1 450 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. En 2003 également, 20 variétés étaient inscrites sur la liste des variétés pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en

France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 41 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV (guide line TG 130/3). La durée minimale d'examen est de 2 cycles, souvent effectués en une année. À l'issue de cette période, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il faut également signaler que le renouvellement variétal est très rapide pour cette espèce à cause de l'apparition de nouvelles races de *Bremia*, et que c'est l'espèce potagère où le nombre de dossiers d'inscription reçus par an au CTPS (54 en 2003) est le plus élevé.

Pour en savoir plus

- Bannerot H., Boulidard L., Marrou J. et Duteil M.**, 1969. Étude de l'hérédité de la tolérance au virus de la mosaïque de la laitue chez la variété Gallega de Invierno. *Ann. Phytopathol.*, 1, 219-226.
- Blancard D., Lot H. et Maisonneuve B.**, 2003. *Maladies des salades : identifier, connaître et maîtriser*. INRA Éditions, Paris, 375 p.
- Chupeau M.-C., Bellini C., Guerche P., Maisonneuve B., Vastra G. et Chupeau Y.**, 1989. Transgenic plants of lettuce (*Lactuca sativa*) obtained through electroporation of protoplasts. *Bio/Technol.*, 7 (5), 503-508.
- Chaux C.L. et Foury C.**, 1994. Laitue. Dans : *Productions légumières – tome 2 – légumes feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes*. Éditions Lavoisier, Paris, 297-342.
- Curtis I.S., Power J.B., de Laat A.M.M., Caboche M. et Davey M.R.**, 1999. Expression of a chimeric nitrate reductase gene in transgenic lettuce reduces nitrate in leaves. *Plant Cell Rep.*, 18 (11), 889-896.
- Dinant S., Maisonneuve B., Albouy J., Chupeau Y., Chupeau M.-C., Bellec Y., Gaudefroy F., Kusiak C., Souche S., Robaglia C. et Lot H.**, 1997. Coat protein gene-mediated protection in *Lactuca sativa* against lettuce mosaic potyvirus strains. *Mol. Breed.*, 3 (1), 75-86.
- Doerschug M.R. et Miller C.O.**, 1967. Chemical control of organ formation in *Lactuca sativa* explants. *Am. J. Bot.*, 54, 410-413.
- Doré C. et Michel H.**, 1981. Multiplication végétative *in vitro* de la laitue (*Lactuca sativa* L.) à partir de plantes en floraison. *Colloque Eucarpia sur les légumes à feuilles*, INRA, Versailles, 10-15.
- Engler D.E. et Grogan R.G.**, 1984. Variation in lettuce plants regenerated from protoplasts. *J. Hered.*, 75, 426-430.
- Hulbert S.H. et Michelmore R.W.**, 1985. Linkage analyses of genes for resistance to downy mildew (*Bremia lactucae*) in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 70, (5), 520-528.

- Irwin S.V., Kesseli R.V., Waycott W., Ryder E.J., Cho J.J. et Micheltmore R.W.**, 1999. Identification of PCR-based markers flanking the recessive LMV resistance gene *mo1* in an intraspecific cross in lettuce. *Genome*, 42 (5), 982-986.
- Jeannequin B., Dosba F. et Amiot-Carlin M.-J., coord.**, 2005. *Fruits et légumes : caractéristiques et principaux enjeux*. INRA Éditions, Paris, 115 p.
- Jeuken M., van Wijk R., Peleman J. et Lindhout P.**, 2001. An integrated interspecific AFLP map of lettuce (*Lactuca*) based on two *L. sativa* × *L. saligna* F₂ populations. *Theor. Appl. Genet.*, 103 (4), 638-647.
- Lot H. et Maisonneuve B.**, 1988. La diversification peut parfois être source d'épidémie. Un exemple : les laitues et la mosaïque. *PHM*, 289, 33-36.
- Maisonneuve B.**, 1987. Utilisation de la culture *in vitro* d'embryons immatures pour des croisements interspécifiques entre *Lactuca sativa* L. et *L. saligna* ou *L. virosa* ; étude des hybrides obtenus. *Agronomie*, 7 (5), 313-319.
- Maisonneuve B., Chupeau M.-C., Bellec Y. et Chupeau Y.**, 1995. Sexual and somatic hybridization in the genus *Lactuca*. *Euphytica*, 85, 281-285.
- Maisonneuve B., Bellec Y., Souche S. et Lot H.**, 1999. New resistance against downy mildew and lettuce mosaic potyvirus in wild *Lactuca* spp. Eucarpia Leafy Vegetables 99, Olomouc, 1999/06/8-11. Dans : A. Lebeda et E. Kristkova, éd., *Proceedings of the Eucarpia meeting on leafy vegetables genetics and breeding*, 191-197.
- Maisonneuve B.**, 2003. *Lactuca virosa*, a source of disease resistance genes for lettuce breeding : results and difficulties for gene introgression. Eucarpia Leafy Vegetables 2003, Noordwijkerhout (The Netherlands), 2003/03/19-21. Dans : Th.J.L. Van Hintum, A. Lebeda, D. Pink et J.W. Schut, éd., *Proceedings of the Eucarpia meeting on leafy vegetables genetics and breeding*, 61-67.
- Maisonneuve B.**, 2003. Laitues. Dans : *Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 212-221.
- Matsumoto E.**, 1991. Interspecific somatic hybridization between lettuce (*Lactuca sativa*) and wild species *L. virosa*. *Plant Cell Rep.*, 9 (10), 531-534.
- Mc Cabe M.S., Schepers F., Van der Arend A., de Laat A.M.M., Power J.B. et Davey M.R.**, 1999. Increased stable inheritance of herbicide resistance in transgenic lettuce carrying a *petE* promoter-bar gene compared with a CaMV 35S-bar gene. *Theor. Appl. Genet.*, 99 (3/4), 587-592.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies de la laitue, de chicorées et de la mâche. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 461-481.
- Micheltmore R.W., Kesseli R.V. et Ryder E.J.**, 1994. Genetic mapping in lettuce. Dans : *DNA-based markers in plants. Advances in cellular and molecular biology of plants*, vol.1. R.L. Phillips et I.K. Vasil, éd., Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 223-229.
- Nagata R.T., Dusky J.A., Ferl R.J., Torres A.C. et Cantliffe D.J.**, 2000. Evaluation of glyphosate resistance in transgenic lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 125 (6), 669-672.
- Paran I., Kesseli R. et Micheltmore R.W.**, 1991. Identification of restriction fragment length polymorphism and random amplified polymorphic DNA markers linked to downy mildew resistance genes in lettuce, using near-isogenic lines. *Genome*, 34, 1021-1027.
- Péron J.-Y.**, 1999. La laitue. Dans : *Productions légumières*. Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 359-372.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Ryder E.J.**, 2001. Current and future issues in lettuce breeding. *Plant Breed. Rev.*, 20, 105-133.
- Teng W.L., Lin C.P. et Liu Y.J.**, 1993. Regenerating lettuce from suspension culture in a 2-liter bioreactor. *HortScience*, 28 (6), 669-671.
- Thicoïpé J.-P.**, 1997. *Les laitues*. Éditions Ctifl, Paris, 281 p.

Le lin

Linum usitatissimum L. ($2n = 2x = 30$)
(Linacées)

Présentation de l'espèce

Le lin, *Linum usitatissimum* L., fut, historiquement, une des premières espèces cultivées. L'Homme utilise sa fibre depuis probablement 10 000 à 15 000 ans. L'histoire du lin se confond ainsi avec la naissance des premières civilisations et sa présence est attestée dans de nombreux sites archéologiques antiques, notamment en Mésopotamie, en Assyrie et en Égypte.

La domestication du lin s'est effectuée au Moyen-Orient, dans le Croissant fertile. La culture du lin a ensuite essaimé de proche en proche au cours de l'époque néolithique, jusqu'à l'Europe.

Au premier siècle, Pline consacre quelques pages de son *Histoire naturelle* à la production et à l'utilisation du lin en Italie, en Germanie et en Gaule. Au Moyen Âge, l'industrie du lin pour fabriquer voiles, draps et habits se développa fortement sous l'impulsion des dynasties régnantes pour qui elle représentait une richesse commerciale majeure.

Du XVI^e au début du XX^e siècle, un commerce spécifique de semences est établi entre la Baltique (Riga, Lettonie) et la Manche (Roscoff, Finistère-Nord) pour importer des graines de lin de « Livonie et de Courlande », réputées les meilleures. Le commerce intense de ces graines était soumis à de sévères contrôles de qualité chez les producteurs et les utilisateurs. Lentement, les pays d'Europe de l'Ouest s'aperçurent que leur propre production, au prix d'une sélection conservatrice rigoureuse, pouvait rivaliser en qualité avec les semences russes. En isolant des lignées à l'intérieur de ces populations, ils obtinrent même des résultats meilleurs. Ces lignées ont servi de base aux programmes de sélection modernes.

Les surfaces emblavées ont culminé à 300 000 ha au XVIII^e siècle. L'industrialisation croissante de la filature et du tissage durant le XIX^e siècle, stimulée par l'introduction du coton dès la fin du XVIII^e siècle, plus facile à travailler donc

moins coûteux, entraîna la chute des cours et provoqua le déclin de la culture, malgré un regain pendant la guerre de Sécession (1861-1865), avec une forte réduction des surfaces (22 000 ha en 1902). Ce sont les Irlandais et les Néerlandais qui mirent en place les premiers programmes de création de variétés dans les années 1920.

Depuis, en dépit de l'introduction des fibres artificielles, puis synthétiques, le lin garde une position, certes marginale mais assez constante, grâce au confort de ses tissus.

Le lin est une espèce annuelle et autogame, ayant sans doute une origine amphidiploïde. Elle est multipliée par semences. Le genre *Linum* L. comprend de nombreuses espèces sauvages, dont certaines sont ornementales. Les possibilités d'hybridation interspécifique sont cependant très limitées.

La variabilité génétique est relativement faible dans le cas du lin à fibres ; elle est importante pour le lin oléagineux. Le lin à fibres est très peu dispersé géographiquement tandis que le lin à huile est très répandu dans le monde.

Il existe des collections : par exemple, l'INRA gère une collection de plus de 1 600 lignées. Il y a aussi des banques de gènes importantes en Russie (VIR) et dans les Pays baltes.

Production et utilisation

Le produit récolté est :

- soit la plante entière, dont la tige est composée de longues fibres dans le cas du lin à fibres ou lin textile ;
- soit le fruit, une capsule contenant 10 graines au maximum, dont on extrait l'huile, dans le cas du lin à huile ou lin oléagineux.

Il s'agit, dans les deux cas, de la même espèce, dont la production orientée par l'Homme, a progressivement déterminé deux types différents de plantes (cultigroupes) :

- le lin à fibres a une tige principale longue et fine (environ un mètre), ramifiée à son extrémité supérieure seulement et portant quelques fleurs ;
- le lin à huile a une tige courte (environ 0,60 m), très ramifiée et portant beaucoup de fleurs.

Le lin à fibres est probablement le seul exemple d'espèce cultivée en France où les semences sont un coproduit et où il n'y a pas de production de semences spécialisée. Toutes les semences sont néanmoins certifiées. Cette particularité s'explique par les très hautes densités de semis (2 000 plantes/m²) et, de ce fait, par la très grande quantité de semences nécessaire. Ceci explique également que la production de semences, puis la création variétale aient été entreprises par des coopératives de teillage qui récupéraient les graines au moment de l'extraction des fibres. Toutes les parties de la plante sont utilisables et utilisées, comme l'indique son nom latin (qui signifie, en effet, extrêmement utile).

Lin textile ou lin à fibres

La France est le deuxième producteur mondial pour la surface et le tonnage de fibres (80 000 ha et 160 000 t de lin teillé en 2004, année particulièrement favorable). La surface cultivée est relativement stable depuis quelques années, mais elle pourrait être plus proche de 60 000 ha en période plus difficile.

La plante entière est arrachée et laissée à terre pour permettre la dégradation des ciments pectiques liant les fibres (étape du rouissage). Puis, une fois rouies et sèches, les pailles (tiges) sont ramassées et pressées en ballots. Elles sont ensuite broyées (étape du teillage) pour briser fibres et parties ligneuses et on extrait :

- les fibres situées entre la cuticule et le liber. Elles sont sous deux formes :
 - le long brin ou filasse ou lin teillé, faisceau cohérent de fibres qui donne le fil de lin de grande valeur commerciale ;
 - les étoupes, fibres désolidarisées du long brin par le processus d'extraction, qui sont des fibres plus courtes et plus grossières (étoupes de teillage et étoupes de peignage) ;
- les anas, qui sont les particules ligneuses qui entourent le cylindre central.

Le débouché principal de la fibre de lin (lin teillé et étoupes) est textile : c'est le long brin qui donnera le fil de lin. Le climat du nord-ouest de la France est idéal et le lin français a acquis la réputation de produire le meilleur fil de lin du monde, avec un rendement très élevé. Le rendement et la qualité du lin à fibres produit en Europe sont supérieurs à ceux de l'ex-URSS et de la Chine. Les tendances de la mode féminine et masculine influent directement sur le contexte économique de cette culture. Actuellement, il y a un fort engouement pour les tissus de lin, seul ou en mélange avec d'autres fibres (naturelles ou synthétiques), surtout utilisés dans la confection de haut de gamme. Sa propriété de fibre naturelle y est très appréciée ainsi que le confort qu'il procure.

La toile de lin, grâce à sa résistance à l'usure, a été traditionnellement employée pour la fabrication des voiles de bateaux, du linge de maison et des tissus dits techniques (sacs postaux, etc.).

Les étoupes de bonne qualité donnent des fils, notamment pour la fabrication de tissus d'ameublement. Les étoupes de mauvaise qualité de même que la paille non rouie sont utilisées pour en faire de la pâte à papier (papier bible et papier monnaie). Les anas peuvent servir à fabriquer des panneaux agglomérés et des litières pour animaux. Les graines non utilisées comme semences servent à la production d'huile ou entrent dans la composition de mélanges en alimentation animale.

Lin oléagineux ou lin à huile

La production de graines de lin oléagineux en France en 2004 a été de près de 54 000 tonnes, d'environ 150 000 tonnes en Europe (il y a de grandes fluctuations d'une année à l'autre), alors que l'Europe en importe 600 000 tonnes par an. La production mondiale est de 1,9 million de tonnes, le Canada et la Chine produisant respectivement 520 000 tonnes et 460 000 tonnes (données FAO, 2004).

La graine entière est utilisée pour l'alimentation animale et également en boulangerie et pâtisserie, mais de façon marginale. Des études ont montré que des lignanes, substances phyto-œstrogéniques présentes dans les graines de lin, ont un rôle anticancéreux et anti-oxydant. Par ailleurs, les graines de lin sont aussi utilisées pour les chevaux pour faciliter le transit intestinal et en cataplasme pour les blessures aux jambes. La graine entière contient environ 40 % d'huile. Après extraction de l'huile et traitement, le résidu solide, le tourteau, sert à l'alimentation du bétail.

La majeure partie de l'huile est utilisée par l'industrie chimique. Sa capacité à s'oxyder au contact de l'air en fait un composé essentiel des peintures et des huiles siccatives. L'utilisation de l'huile de lin pour la peinture est devenue marginale, mais d'autres utilisations de l'huile se sont développées : fabrication de linoléum, de savons (pour le carrelage), d'encre d'imprimerie, de résines, etc. L'huile extraite de la graine peut avoir des applications industrielles alimentaires et pharmaceutiques. La vente d'huile de lin en vue de la consommation humaine est interdite en France (et au Portugal en Europe).

Histoire des variétés cultivées en France

On distingue le lin de type printemps, semé au début du printemps et le lin de type hiver plus tolérant au froid et qui peut être semé à l'automne dans les zones habituelles de culture. Sauf précision, les variétés décrites ci-dessous sont de type printemps.

Les variétés de lin à fibres comme à huile sont toutes des lignées pures.

Lin à fibres

Variétés anciennes

1816, '**Frison à fleurs blanches**' est une lignée isolée à partir des populations russes.

1921, '**Concurrent**' (Station de Sélection de Leenwarden, Pays-Bas), variété à fleur blanche, issue de la sélection pratiquée aux Pays-Bas. Elle a été la plus cultivée jusqu'en 1952.

1952, '**Wiera**' (Wiersema Mzn, Pays-Bas), variété néerlandaise très cultivée en France. Elle avait un bon rendement, mais tous ses caractères n'étaient pas fixés. Cette variété a contribué à la prépondérance des variétés néerlandaises dans les années 1950-1970.

Variétés récentes

1970, '**Hera**' (Landbouwbureau Wierum, Pays-Bas), variété néerlandaise très cultivée en France. Elle avait un bon rendement, mais sa sensibilité à la fusariose a rendu sa culture difficile. Cette situation a probablement eu un effet stimulant pour la sélection française.

1970, '**Natasja**' (Frisje Madschap van Landbouw Leenwarden, Pays-Bas), première variété de lin à fibres résistante à la fusariose. Elle n'a jamais pu être inscrite au catalogue officiel français, mais elle a été la variété la plus cultivée pendant dix ans.

1978, '**Ariane**' (Coop. Fontaine-Cany, France), variété se caractérisant par un rendement supérieur de 20 % par rapport aux variétés de l'époque et par sa tolérance à la fusariose. Cette variété a représenté 70 % des surfaces de l'Europe de l'Ouest. Sa seule faiblesse est une tolérance réduite à la brûlure (maladie tellurique occasionnée par l'action d'un complexe parasitaire dont la principale composante est un champignon, *Chalara elegans* (anciennement *Thielaviopsis basicola*). Ce fut la première variété française ayant un fort développement. Elle a dominé le marché des semences de lin textile en Europe de l'Ouest pendant près de 20 ans.

1982, '**Bélinka**' (Cebeco, Pays-Bas), variété qui a représenté un bon compromis entre rendement en fibre et qualité de fibre avec, en outre, un très bon rendement en graines. Elle a bénéficié d'un bon développement commercial.

1985, '**Viking**' (INRA / Coop. Fontaine-Cany, France), variété très riche en fibre et précoce.

1989, '**Laura**' (Cebeco, Pays-Bas), variété remarquable pour sa très bonne résistance à la verse et sa bonne résistance à la brûlure.

1992, '**Hermès**' (INRA/ Coop. Fontaine-Cany, France), variété se distinguant par un très bon rendement, ce qui lui a valu de devenir une variété leader. C'est la variété de lin à fibres la plus cultivée en France au début des années 2000.

1995, '**Diane**' (Coop. Fontaine-Cany, France), variété riche en fibre et montrant une bonne résistance à la brûlure.

2000, '**Adélie**' (Terre de Lin, France), première variété de lin textile de type hiver. Ce lin peut être semé en septembre, ce qui permet d'échapper au stress hydrique, d'exprimer un plus grand potentiel de productivité et surtout une plus grande précocité. Celle-ci devrait permettre d'augmenter la probabilité d'un meilleur rouissage et de bonnes conditions de ramassage.

Lin à huile

Variétés anciennes

1950-70, '**Maroc**', « variété population », en fait nom générique se rapportant sans doute à plusieurs variétés lignées pures différentes. Semée en automne en Afrique du Nord, elle avait un fort rendement en conditions sèches et était peu sensible à la cassure de la tige et à *Ascochyta linicola*. Elle provient d'une sélection dans des populations marocaines à grosses graines.

Variétés récentes

1976, '**Océan**' (INRA/Coop. lin Plessis-Belleville, France), une des premières variétés de lin oléagineux ayant une productivité satisfaisante.

1989, **‘Mikaël’** (INRA/Coop. Plessis-Belleville, France), variété moderne réalisant un bon compromis entre précocité et productivité. Elle est, de plus, tolérante à la fusariose. Cette variété a eu un bon développement commercial et est depuis longtemps un témoin CTPS.

1993, **‘Barbara’** (G.K.I., Hongrie), variété hongroise se caractérisant par sa productivité.

1995, **‘Oliver’** (Lin 2000/INRA, France), première variété de lin oléagineux véritablement de type hiver. Ce lin peut être semé en septembre, ce qui apporte plusieurs avantages dont la précocité. Cette dernière permet de faciliter la récolte en augmentant la probabilité de pouvoir bénéficier d’une période de faible hygrométrie pour la récolte.

1997, **‘Baïkal’** (Laboulet, France), variété tardive de printemps d’un bon rendement.

Remarque. Le fond génétique utilisé par les sélectionneurs de lin à fibres est très restreint alors que celui du lin à huile, cultivé partout dans le monde, est beaucoup plus large.

Regard sur 50 ans de sélection

Le lin est une espèce de faible importance économique à l’échelle nationale, par rapport aux céréales. Cependant, c’est une espèce très importante dans les régions traditionnelles de culture (Normandie, Nord-Pas-de-Calais). La sélection française du lin textile a débuté avant la deuxième guerre mondiale. Peu développée au départ, elle était uniquement conduite par l’INRA, puis à partir des années 1960, par deux coopératives linières. Cette sélection menée par les voies classiques de l’amélioration variétale et avec des moyens très modestes, a permis d’accroître le rendement en fibre de manière très sensible. Elle s’est imposée face à la sélection néerlandaise avec la création de la variété ‘Ariane’. Elle a introduit la tolérance au froid pour le lin oléagineux dans les années 1980-1990 et plus récemment pour le lin à fibres. La création de variétés résistantes à la fusariose a été un élément important pour le maintien de la culture de cette plante en France. La sélection en Europe de l’Est est toujours restée moins performante que celles des Pays-Bas et de la France. Enfin, assez récemment, des sélectionneurs australiens et canadiens ont tenté de créer des variétés dont l’huile convient pour l’alimentation humaine.

Caractères importants améliorés

Lin à fibres de printemps

Rendement. Les possibilités d’augmentation de la production de fibre/ha sont limitées car l’augmentation du rendement en paille par la taille de la plante se heurte au risque de verse et également à l’inadaptation des matériels spécifiques de transformation pour traiter des lanières fibreuses plus longues. Par contre,

l'amélioration des plantes a largement contribué au maintien de la culture du lin à fibres et de sa compétitivité, grâce à la création de variétés ayant une richesse en fibre de la tige très nettement augmentée. Le lin à fibres produit, à l'heure actuelle, environ 7 t/ha de paille, 2 500 kg/ha de fibre dont 1 500 kg/ha de fibre longue.

Résistance à la verse. C'est un critère essentiel, qui, comme la qualité de la fibre, ne peut se juger, jusqu'à présent, que très tardivement. Ce caractère a été visiblement amélioré par la sélection, mais le progrès est impossible à quantifier. On dispose maintenant de régulateurs de croissance qui peuvent corriger certains défauts d'une variété ou certaines erreurs du liniculteur.

Qualité de la fibre. Encore plus que la verse, elle se définit *a posteriori*. Une autre difficulté est le manque de définition précise de la qualité requise pour certaines applications. Il existe très peu de tests directs pour l'évaluer et ces tests ne représentent pas toute la qualité. De plus, son évaluation nécessite de disposer de suffisamment de matériel obtenu en conditions normales de culture (2 000 plantes/m²). Enfin, la qualité de la fibre dépend, en grande partie, du rouissage. Si la qualité intrinsèque peut être difficilement améliorée par le sélectionneur, il peut indirectement améliorer la qualité de la fibre par la tolérance à la verse et aux maladies.

Tolérance à la fusariose. Un autre point très positif a été l'acquisition d'une bonne tolérance à la fusariose (causée par un champignon du sol, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lini*) qui permet la culture du lin dans les zones infestées par cette maladie. Cependant, pour éviter l'érosion de cette tolérance, il est indispensable de respecter une longue rotation culturale (6 à 7 ans).

Lin à huile de printemps

Rendement. L'amélioration du rendement, quoiqu'encore insuffisant, a permis de maintenir la culture. Le rendement est de 15 à 30 q/ha avec une graine dont la teneur en huile est supérieure à 40 %. Mais, le principal problème est l'irrégularité du rendement, lié souvent à des stress hydriques ou à des problèmes parasitaires.

Résistance à la verse. La verse entraîne une difficulté supplémentaire de récolte qui peut contribuer à diminuer le rendement chez l'agriculteur. Ce caractère a été amélioré, mais il est difficile de quantifier le progrès accompli, comme pour le lin à fibres.

Précocité. Les sélectionneurs ont créé une certaine gamme de précocité. Cela permet à l'agriculteur de choisir des variétés adaptées aux régions de culture et d'avoir ainsi une meilleure sécurité de récolte.

Richesse et qualité. La richesse en huile a progressé en partie, indirectement, grâce à l'apparition d'appareils de mesure de la teneur en huile. Par contre, les questions de teneur en acides gras et de leur proportion ont été peu étudiées en France de même que la qualité du tourteau. L'huile de lin, qui est riche en acide α -linoléinique (environ 60 %), s'oxyde rapidement et rancit, mais cette caractéristique, qui la rend

siccative, est intéressante pour certaines industries. Des variétés adaptées à la consommation humaine ont été produites, du type « solin » au Canada, dont l'huile est pauvre (moins de 3 %) en acide α -linoléique ('LinolaTM 947'). Ce type de variétés n'est pas développé en France, pour des raisons techniques indépendantes de la réglementation, notamment parce qu'elles sont moins productives que le tournesol et qu'elles se trouvent en concurrence avec lui pour les caractéristiques de l'huile.

Tolérance aux maladies. La rouille du lin (*Melampsora lini*) qui a servi de modèle pour l'étude des relations hôte-parasite (théorie de Flor) n'est pas un problème en Europe du Nord. On retrouve les mêmes maladies et les mêmes améliorations que pour le lin à fibres, par contre les priorités sont différentes. La résistance à l'oïdium (*Oidium lini*) a été améliorée malgré certains échecs récents (surpassement d'une résistance oligogénique), mais la tolérance polygénique reste efficace. Le lin à huile est une bonne source de variabilité pour l'amélioration des résistances et/ou tolérances aux maladies du lin à fibres (fusariose).

Lin d'hiver (lin à fibres ou lin à huile)

La création de variétés de lin d'hiver, c'est-à-dire résistantes au froid (environ – 14 °C) et pouvant être semées à l'automne, peut permettre de résoudre une partie des problèmes liés à l'amélioration du lin de printemps.

Rendement. Une plus longue période de végétation du lin d'hiver apporte, pour le lin à huile, une augmentation du rendement en graines et de sa régularité en évitant les stress hydriques de la fin du printemps (enracinement d'1 m au lieu de 0,60 m). Pour le lin à fibres, le recul n'est pas suffisant pour évaluer l'impact du changement de période de culture sur ce caractère.

Précocité. Les variétés de lin d'hiver se récoltent beaucoup plus tôt (environ 3 semaines avant celles du lin de printemps), ce qui devrait :

- pour le lin à fibres, permettre d'assurer de meilleures conditions de rouissage (probabilité accrue d'avoir une meilleure séquence climatique). Ceci se traduit par une meilleure qualité de la fibre, par une plus grande sécurité de récolte et surtout permet d'éviter les accidents de surrouissage (stade trop avancé de dégradation des ciments pectiques liant les fibres entre elles, ce qui conduit à une perte de résistance à la traction de la filasse ou fibre technique) qui entraînent la perte de la récolte ;
- pour le lin à huile, faciliter la récolte réputée difficile chez ce cultigroupe (probabilité accrue de trouver une période à faible hygrométrie pour récolter facilement le lin).

Le rendement et la précocité ont des retombées positives sur la qualité.

Difficultés ou obstacles

La résistance au froid est encore insuffisante pour permettre la culture du lin à huile dans les zones de climat continental.

Une autre difficulté apparue plus récemment est le développement de certaines maladies, en particulier la cassure de la tige (causée par *Polyspora lini*) qui, par la verse précoce qu'elle entraîne, peut conduire à la perte de la culture du lin à fibres comme de celle du lin à huile.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE en France (sauf pour études fondamentales). OUI à l'étranger Des variétés de type « solin » à teneur réduite en acide α-linoléinique ont été obtenues par mutagenèse au MSE ('Linola'TM 947' au Canada). Au moins sept autres variétés ont été obtenues par mutagenèse : en Chine (en 1978 : 'Heiya 4', en 1985 : 'Heiya 6' et en 1991 'Heiya 7'), au Canada (en 1979 : 'Dufferin'), en Russie (en 1988 : 'Zarja 87') et en Lituanie (en 1989 : 'Baltychai').
Croisements interspécifiques	ESSAIS Très peu de croisements interspécifiques sont possibles avec d'autres espèces de <i>Linum</i>.
Hybridation somatique	ESSAIS La difficulté principale consiste à régénérer des bourgeons à partir de cals.
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	OUI au Canada et aux États-Unis <i>Agrobacterium tumefaciens</i> a été utilisé avec succès dès 1992 pour créer les premières variétés de lin transgénique. Des variétés de lin transgéniques résistantes aux sulfonylurées (herbicides), sont autorisées à la commercialisation au Canada depuis 1998 ('CDC Triffid'). Le lin est une espèce où les flux de gènes sont pratiquement inexistant. ESSAIS Des programmes visant à faire des variétés de lin possédant une huile modifiée sont en cours, en France notamment.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	ESSAIS Plusieurs méthodes sont possibles, mais le rendement est trop faible pour pouvoir utiliser l'haplométhode.
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE

suite...

... suite

Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Des cartes génétiques de lin ont déjà été produites. Des marqueurs de gènes de résistance à la fusariose et à la rouille ont été identifiés. La recherche de nouveaux marqueurs moléculaires est en cours. Des marqueurs moléculaires sont utilisés de manière à mieux gérer les ressources génétiques.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	La méthode généalogique différée (ou sélection en mélanges ou méthode <i>bulk</i>) est la plus couramment pratiquée. Des étapes de sélection massale et des plans de croisements coniques sont quelquefois utilisés.
Types variétaux	Variété lignée pure. Toutes les variétés cultivées actuellement en France sont des lignées pures. ESSAIS Variété hybride F₁. Un effet d'hétérosis peut être observé, mais il n'y a pas de variétés hybrides F ₁ car cela entraînerait un surcoût rédhibitoire des semences pour les producteurs de lin. Ce type variétal est donc inenvisageable.

Perspectives d'amélioration

Les perspectives sont principalement orientées vers des améliorations sur le plan pathologique pour combattre oïdium, fusariose, brûlure et septoriose. La résistance à la verse est également un objectif important. Dans le cas du lin à fibres, il faut ajouter l'amélioration de la qualité de la fibre, c'est-à-dire un meilleur potentiel de finesse de celle-ci. Les gains de rendement en fibres sont toujours un objectif, mais ils seront probablement plus difficiles à obtenir que les autres caractères.

Enfin, l'introduction d'un nouveau type, le lin d'hiver a révélé des problèmes nouveaux comme l'amélioration pour la tolérance au froid et pour la résistance à des agents pathogènes différents. Ce type est, à ce jour, moins performant que le type printemps sur l'ensemble des caractères de sélection, sauf la tolérance au froid. Il offre donc de nombreuses perspectives de progrès génétique dans les années à venir.

Caractères à améliorer

Lin à fibres

Tolérance aux maladies. Un des progrès recherchés dans les quelques années à venir est la création de variétés possédant la double tolérance fusariose / brûlure. L'introduction de la tolérance à la cassure de la tige causée par *Polyspora lini* et de la tolérance à la septoriose due à *Septoria linicola* doit aussi être envisagée. De

plus, l'oïdium (*Oidium lini*) commence à poser de sérieux problèmes et il faudrait envisager d'introduire une tolérance, comme cela a été fait pour certaines variétés de lin à huile ('Jupiter').

Résistance à la verse. Tout progrès sur ce caractère est intéressant : soit il permet une évolution dans la conduite de culture avec des semis à une densité toujours plus forte favorable à la qualité des fibres, soit il sécurise la récolte. C'est un caractère difficile à travailler, mais central dans la sélection du lin, qui reste une des bases des programmes d'amélioration.

Meilleure aptitude à la division des faisceaux fibreux. Le progrès dans la richesse en fibres a été obtenu en augmentant le nombre de fibres par faisceau. Ces faisceaux doivent être divisés par clivage longitudinal par l'action mécanique des appareils de préparation à la filature, action qui est, en principe, facilitée par le rouissage. Cette division peut être plus agressive si les faisceaux sont plus « épais » ; elle serait facilitée par une modification de la nature des ciments pectiques qui lient les fibres entre elles pour en réduire la cohésion.

Spécialisation de la qualité de la fibre. Certaines utilisations industrielles utilisent des fibres élémentaires de lin, totalement débarrassées de tout ciment et liaison entre elles, contrairement aux usages textiles. Dans ce cas, les spécifications qualitatives requises sont totalement différentes et on peut envisager la possibilité d'augmenter la production de « fibres totales » sans tenir compte de la finesse (lin très riche en fibres et à fort développement végétatif).

Résistance au froid et résistance à l'hiver. Ces deux caractères sont différents et ne doivent pas être confondus. La résistance au froid peut être considérée comme la température minimale qu'un lin peut supporter, aujourd'hui de l'ordre de -15 à -17 °C. Ceci est parfois insuffisant pour conduire une culture en pleine sécurité et limite donc la culture aux zones qui connaissent un hiver pas trop rigoureux. La résistance à l'hiver est plus complexe, car elle dépend de la façon dont le froid arrive (descente rapide ou lente de la température, endurcissement, présence ou non de vent, etc.) et du stade auquel se trouve la variété au moment où l'épisode de froid a lieu (le stade varie en fonction de la précocité). Le développement des champignons pathogènes (*Botrytis cinerea*, *Polypora lini*, etc.) dans la période hivernale concerne aussi ce caractère. Ainsi, le *Botrytis cinerea* qui n'attaque qu'occasionnellement les capsules de lin de printemps, peut causer des dégâts importants sur le lin d'hiver, en s'installant sur de jeunes plantes ayant souffert de l'hiver. Il y a donc beaucoup de raisons pour chercher à augmenter la résistance au froid et à l'hiver.

Lin à huile

Régularité et niveau du rendement. Ils doivent être améliorés pour augmenter la rentabilité et assurer le maintien de la culture en Europe.

Tolérance aux maladies. Un certain nombre de maladies cryptogamiques sont apparues récemment. Il n'y avait aucun fongicide homologué pour ce cultigroupe

avant 2001. La possibilité d'utiliser un fongicide homologué dans un essai comparatif a montré l'importance de ces maladies, qui peuvent conduire à une diminution du rendement de 20 à 30 % pour certaines variétés. La cassure de la tige est une maladie importante du lin d'hiver qui provoque une verse précoce. Des tolérances sont recherchées.

Qualité de l'huile. Il faudrait augmenter la teneur en huile et la richesse en acide α -linoléique pour des utilisations industrielles et sans doute aussi alimentaires (alimentation animale). Des travaux de transgénèse sont en cours pour obtenir un lin produisant une huile lubrifiante, c'est-à-dire restant fluide et non dégradée à toute température.

Diversification. Les co-produits du lin sont nombreux et utilisés dans des applications industrielles très variées qui pourraient motiver des programmes de sélection particuliers. Ainsi, la paille du lin oléagineux contient des fibres et de la cellulose que l'industrie pourrait valoriser (papier, étoupes, produits isolants, etc.) à condition que la culture soit assurée sur le long terme dans certaines régions. Le développement de cette filière industrielle aurait aussi pour avantage de permettre à l'agriculteur de se débarrasser de la paille, ce sous-produit qui se décompose très mal et dont il ne sait que faire. Le développement de variétés de lin adaptées à des débouchés divers est donc envisageable.

Résistance au froid et à l'hiver. L'augmentation de la productivité peut passer par un allongement de la durée de végétation avec un semis d'automne. La démonstration a été faite avec 'Oliver'. Il reste cependant à améliorer de nombreux caractères pour assurer une bonne survie de la plante pendant l'hiver, pour maintenir et développer la culture (tolérance au *Polyspora lini*, moindre sensibilité au *Botrytis cinerea* et aussi amélioration intrinsèque de la tolérance au froid).

Techniques à développer

Beaucoup de caractères sont quantitatifs et difficiles à apprécier en pépinière à faible densité dans les premières générations de sélection, car les conditions sont trop éloignées des conditions de culture en production. L'identification de marqueurs moléculaires, la sélection assistée par marqueurs et la transgénèse pourraient apporter des solutions.

L'utilisation d'appareils, basés sur la réflexion ou l'absorption du rayonnement du proche infrarouge (NIR) facilitant la mesure des teneurs en huile, permettra, à terme, de quantifier plusieurs caractères déterminants dans la qualité de l'huile.

Inscription et protection des variétés en France

1949, création du catalogue français des variétés de lin et de chanvre.

1968, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste spéciale de plantes oléagineuses multipliées en France en vue de leur exportation.

En 2003, 19 variétés de lin à fibres (textile) et 17 variétés de lin à huile (oléagineux) étaient inscrites au catalogue officiel français (listes A et B) et 28 variétés de lin à fibres et 63 variétés de lin à huile au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, environ 15 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de cette période, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Les variétés de lin étant des lignées pures, l'homogénéité et la stabilité sont généralement satisfaisantes. Par contre, des difficultés dans la distinction se posent pour des variétés de lin à fibres du fait de la relative rareté des critères morphologiques et de la faible variabilité génétique, ce qui conduit à des problèmes réels pour l'inscription de nouvelles variétés.

Des tests VAT concernant de nombreux paramètres sont aussi réalisés pendant 2 années. Les principaux critères de valeur d'utilisation pris en compte pour l'inscription au catalogue sont la productivité en fibres ou en graines, certaines qualités technologiques (teneur en fibres, en huile) ainsi que les résistances aux maladies (fusariose, brûlure) et à la verse. Ces dernières années, une diversification des variétés est apparue : variétés à graines jaunes pour l'alimentation humaine, variétés de type « hiver » ou encore variétés mixtes (fibres + huile) dédiées à des usages industriels particuliers. Une réflexion est en cours afin de mettre en place des tests, en conditions contrôlées, de mesure de la résistance au froid dans des régions spécifiques telles que la Côte-d'Or et en chambres climatisées. Des efforts restent à accomplir pour intégrer davantage la qualité intrinsèque des produits dans le système d'évaluation de valeur agronomique (qualité de la fibre, composition en acides gras de l'huile).

Pour en savoir plus

Site internet des ressources génétiques de lin INRA : <http://www.inra.fr/lin/>

Bergmann R. et Friedt W., 1997. Haploidy and related biotechnological methods in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Curr. Plant Sci. Biotechnol. Agric.*, 23, 1-16.

Bretagne B., Fouilloux G. et Chupeau Y., 1996. Induced albina mutations as a tool for genetic analysis and cell biology in flax (*Linum usitatissimum*). *J. Exp. Bot.*, 47 (295), 189-194.

Fouilloux G., 1995. Improving oleaginous flax. *Biofutur*, 148, 24-26.

Fouilloux G., 1995. Les lins oléagineux d'hiver : bilans et perspectives. *O.C.L.*, 2 (4), 271-273.

- Flor H.H.**, 1955. Host-parasite interaction in flax rust. Its genetics and other implications. *Phytopathology*, 45, 680-685.
- Friedt W., Bickert C. et Shaud H.**, 1995. In vitro breeding of high-linolenic, doubled-haploid lines of linseed (*Linum usitatissimum* L.) via androgenesis. *Plant Breed.*, 114 (4), 322-326.
- Fu Y.B., Peterson G., Diederichsen A. et Richards K.W.**, 2002. RAPD analysis of genetic relationships of seven flax species in the genus *Linum* L. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 49 (3), 253-259.
- Hausner G., Rashid K.Y., Kenaschuk E.O. et Procnunier J.D.**, 1999. The development of codominant PCR/RFLP based markers for the flax rust-resistance alleles at the L locus. *Genome*, 42 (1), 1-8.
- ITL**, 1988. *La culture du lin fibre*. ITL, Paris, 57 p.
- Kenaschuk E.O. et Rowland G.G.**, 1995. Flax. Dans : *Harvest of Gold. The history of field crop breeding in Canada*, A.E. Slinkard et D.R. Knott, University Extension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, 173-176.
- Marshall G.**, 1989. *Flax : Breeding and Utilisation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 171 p.
- Mc Hughen A., Rowland G.G., Holm F.A., Bhatti R.S. et Kenaschuk E.O.**, 1997. CDC Trifid transgenic flax. *Can. J. Plant Sci.*, 77 (4), 641-643.
- Mc Hughen A.**, 1987. Salt tolerance through increased vigor in a flax line (STS-11) selected for salt tolerance in vitro. *Theor. Appl. Genet.*, 74 (6), 727-732.
- Mc Hughen A. et Jordan M.C.**, 1989. Recovery of transgenic plants from « escape » shoots. *Plant Cell Rep.*, 7 (8), 611-614.
- Mc Sheffrey S.A., Mc Hughen A. et Devine M.D.**, 1992. Characterization of transgenic sulfonylurea-resistant flax (*Linum usitatissimum*). *Theor. Appl. Genet.*, 84, 480-486.
- Montaigne J.-M.**, 1997. Images du lin textile, – 8000 ans + 2000 ans. ASI Communication, Rouen, 192 p.
- Moule C.**, 1972. Plantes à fibres : lin. Dans : *Les plantes sarclées*. La Maison rustique, Paris, 207-221.
- Plonka F.**, 1965. Les lins cultivés. *Cahiers CIBA*, 2, 3-9.
- Plonka F. et Anselme C.**, 1956. *Les variétés de lin et leurs principales maladies cryptogamiques*. INRA, Paris, 179 p.
- Spielmeier W., Green A.G., Bittisnich D., Mendham N. et Lagudah E.S.**, 1998. Identification of quantitative trait loci contributing to *Fusarium* wilt resistance on an AFLP linkage map of flax (*Linum usitatissimum*). *Theor. Appl. Genet.*, 97 (4), 633-641.
- van Treuren R., van Soest L.J.M. et van Hintum T.J.L.**, 2001. Marker-assisted rationalisation of genetic resource collections : a case study in flax using ALFPs. *Theor. Appl. Genet.*, 103 (1), 144-152.
- Trouvé J.-P.**, 1996. *Évaluation précoce et fixation rapide par haplométhode du matériel génétique du lin textile en vue de l'adaptation de la sélection récurrente à cette espèce* (*Linum usitatissimum* L.). Thèse INA-PG, Paris, 104 p.

La luzerne

Medicago sativa L. ($2n = 4x = 32$)
(Fabacées ou Papilionacées)

Présentation de l'espèce

La luzerne, *Medicago sativa* L., est originaire du Croissant fertile au Moyen-Orient. Elle s'est ensuite répandue dans la région montagneuse transcaucasienne et l'Asie centrale qui sont devenues deux centres de diversification. La luzerne est probablement cultivée depuis 9 000 ans. L'usage de la luzerne, en tant qu'aliment pour les animaux, est mentionné dans des tablettes hittites remontant à 1 400 ans av. J.-C. La luzerne s'est répandue en Europe de l'Ouest à l'occasion des conquêtes romaines, puis arabes. Dès le XVIII^e siècle, Olivier de Serres, recommande l'usage de « cette plante améliorante » dans la succession des cultures. Il a fallu attendre le XIX^e siècle pour que la luzerne soit introduite en Amérique et en Australie.

La luzerne est une espèce autotétraploïde, pérenne, allogame et à fécondation entomophile, qui est multipliée par semences. Comme les autres Légumineuses, elle ne nécessite pas d'apport d'engrais azoté grâce à sa symbiose avec une bactérie *Sinorhizobium meliloti*. La luzerne croît à l'état sauvage de la Chine à l'Espagne et de la Suède à l'Afrique du Nord. Dans ces pays, les flux de gènes sont possibles entre espèces sauvages et espèces cultivées.

La variabilité de la luzerne est très importante. Il existe des écotypes adaptés à la plupart des conditions environnementales, ce qui est le signe d'une grande variabilité génétique. La plupart de ces écotypes sont de la luzerne cultivée qui est maintenue par les agriculteurs. Une partie de cette biodiversité est en danger, car située dans des pays au climat politique tendu ou connaissant une forte évolution des pratiques agricoles.

Les deux plus grandes collections de luzerne se trouvent en Russie (VIR, environ 3 700 génotypes) et aux États-Unis (Washington, environ 2 300 génotypes). Le Canada, l'Australie, la Syrie et la France possèdent aussi des collections importantes. Le manque chronique de moyens financiers conduit à un

ralentissement des travaux ayant trait à la caractérisation et à l'évaluation des ressources génétiques présentes dans ces collections.

Production et utilisation

Le produit récolté est la partie aérienne de la plante, de préférence avant le début de la floraison.

La luzerne est une plante fourragère recherchée, car c'est l'espèce qui produit le plus de protéines à l'hectare (2,5 t/ha/an). Elle est aussi très riche en minéraux assimilables par les ruminants et contient au moins 10 vitamines. Par contre, sa valeur énergétique est assez moyenne (0,7 UF/kg de matière sèche). Ces caractéristiques font de la luzerne un bon complément des céréales pour l'alimentation animale. Elle est, de plus, très appétible et ingestible. Enfin, elle représente une très bonne tête d'assolement, résiste bien à la sécheresse et se montre de culture et d'entretien faciles et peu coûteux.

La luzerne est probablement la plante fourragère la plus cultivée au monde. En 1990, la culture de la luzerne recouvrait 25 millions d'hectares dont 10 millions aux États-Unis. Alors qu'en 1990, la surface cultivée en France était de 800 000 ha, cette culture a régressé et couvre en 2004 environ 450 000 ha dont environ un tiers en association, notamment avec le dactyle (*Dactylis glomerata* L. subsp. *glomerata* L.).

La luzerne est principalement utilisée pour l'alimentation des ruminants, mais elle a aussi quelques débouchés en alimentation humaine et en industrie pharmaceutique.

Alimentation animale. La principale utilisation est la « conserve » sous forme de foin ou d'ensilage (ce dernier est difficile en raison du fort pouvoir tampon du fourrage vis-à-vis du pH et coûteux) ou d'enrubannage. La luzerne est aussi utilisée après déshydratation. Pour la déshydratation, la luzerne est exploitée de manière industrielle. L'utilisation de la luzerne par le pâturage est limitée par la faible résistance au piétinement et surtout par les risques de météorisation (ballonnement de l'abdomen des animaux, dû à l'emprisonnement dans des réseaux protéiques des gaz issus de la fermentation) encourus par les ruminants. Ce risque peut être limité par une conduite adaptée du pâturage et par la culture de la luzerne en association avec une graminée.

Alimentation humaine. Un tiers de la production annuelle de miel aux États-Unis provient des champs de multiplication de semences de luzerne. Les jeunes pousses de luzerne sont aussi utilisées pour l'alimentation humaine dans certains pays. Des travaux ont été entrepris pour utiliser des extraits foliaires de luzerne comme aliments destinés à des populations souffrant de carence alimentaire forte, et en particulier des enfants. Les propriétés de la luzerne justifiant cette utilisation sont la forte teneur en protéines des extraits foliaires et la teneur élevée en vitamines et minéraux. Un tel projet est en cours à une échelle pré-industrielle en Amérique centrale.

Industrie. La ribulose-1,5-biphosphate carboxylase oxygénase (« rubisco ») est une protéine, présente en quantité très importante dans les feuilles, dont le produit de la purification est exploitée chez la luzerne. Elle est utilisée essentiellement pour des enrichissements en protéines et en pigments (carotènes et xanthophylles) dans des fabrications agroalimentaires. En 2004, la production de « rubisco » en France a été de 4 tonnes.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés françaises anciennes

Il s'agit de populations naturelles adaptées au milieu local. Parmi elles :

'Provence', population surtout cultivée dans le sud-est de la France, peu résistante au froid en raison d'une « dormance hivernale » peu prononcée, avec une forte croissance estivale.

'Poitou', **'Marais de Challans'** et **'Marais de Luçon'**, populations de l'ouest de la France, peu résistantes au froid, à tige fine et à floraison tardive, assez bien adaptées aux excès d'eau.

'Flamande', population à floraison précoce cultivée dans le nord de la France. Cette population présente une forte proportion de fleurs bigarrées, signe de croisements anciens entre la luzerne cultivée (*Medicago sativa*) et une luzerne pérenne sauvage (*Medicago falcata* L.), espèce génétiquement proche, appartenant au même complexe d'espèces. *Medicago falcata* a une fleur jaune et une gousse en faucille alors que la luzerne cultivée a une fleur violette et une gousse spiralée. La population 'Flamande' présente des tiges dressées, donc une bonne adaptation à la fauche, et une forte productivité. Le niveau de résistance au froid de cette population est très bon, en raison d'une dormance hivernale marquée. Cette population a donné naissance au type « flamand ».

'Ormelong', population à floraison précoce cultivée en Beauce.

Variétés sélectionnées

1952, **'Orchésienne'** (Bonte, France), une des premières variétés synthétiques créées en vue de l'abandon des variétés populations envisagé dans les années 1950. Elle est issue d'une sélection massale dans la population traditionnelle 'Flamande'.

1961, **'Europe'** (Desprez, France), variété synthétique également issue d'une sélection massale dans la population naturelle 'Flamande'. Cette variété, résistante au froid et à la verse a eu une large diffusion. Vers la fin des années 1970, cette variété a bénéficié d'une amélioration pour sa résistance à la verticilliose. Sa durée de vie est très longue, puisqu'elle était encore la quatrième variété la plus cultivée en France en 2001 et qu'elle est toujours un témoin CTPS, ce qui est un record de durée.

1977, '**Resis**' (L. Daehnfeldt, Danemark), première variété synthétique d'un très haut niveau de résistance à la verticilliose. Cette variété synthétique se caractérise aussi par un taux élevé de protéines.

1988, '**Medalfa**' (Amfo / Blondeau / Desprez Veuve et Fils / INRA / Lafite / Serasem / Tourneur Gr. Cult. / Verneuil Recherche, France), variété synthétique présentant une dormance intermédiaire, qui est bien adaptée à la zone méditerranéenne.

1991, '**Diane**' (Verneuil Semunion, France), variété synthétique se distinguant par sa qualité et sa teneur en protéines. Elle connaît un beau succès commercial.

1993, '**Luzelle**' (INRA, France), variété synthétique donnant une plante au port prostré, résistant bien au pâturage. Cette variété, du fait de sa capacité à supporter des sols défavorables à la culture de la luzerne, a permis d'accroître l'aire de culture de cette espèce.

1994, '**Mercedes**' (Limagrain Genetics Fr., France), variété synthétique se caractérisant par une teneur en protéines très élevée et une résistance au nématode des tiges. Cette variété a connu un succès commercial important, notamment en Champagne où on pratique la déshydratation de la luzerne, lorsque ce parasite s'est répandu dans cette région. Elle a ouvert la voie à une nouvelle génération de variétés ayant cette caractéristique. Mais, elle semble assez sensible à l'anthracnose.

1994, '**Julia**' (Verneuil Semunion, France), variété synthétique ayant une bonne teneur en protéines. Cette variété n'a connu qu'un très faible développement commercial.

1997, '**Marshal**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété synthétique résistante à l'anthracnose. Ce caractère est devenu plus important car cette maladie est en voie d'expansion en raison des étés plus chauds (changement climatique).

1998, '**Coussouls**' (INRA, France), variété synthétique très bien adaptée au pâturage en Région méditerranéenne.

1998, '**Luisante**' (INRA, France), variété synthétique inscrite en liste B, dont la digestibilité a été améliorée de 8 % par rapport à celle de la variété 'Europe'.

Remarque. Les variétés de luzerne cultivées en France peuvent être classées en deux types : le type « flamand » et le type « méditerranéen ». La majorité des variétés inscrites au catalogue français et cultivées sont de type « flamand ». Les variétés de type « méditerranéen », bien que disposant d'une faible dormance automnale, se distinguent par une grande variabilité. La faible dormance n'est une source de faible pérennité que dans les zones à hivers froids. Les variétés de type « méditerranéen » ont une bonne pérennité dans le sud de la France et en zone méditerranéenne. La sélection a créé de la variabilité en générant des nouvelles variétés. Une cinquantaine de variétés, en majorité de type « flamand », est cultivée, à des niveaux variables en France.

Regard sur 50 ans de sélection

Dans un premier temps, la sélection de la luzerne s'est surtout illustrée par l'amélioration de la productivité et de la résistance à la verse. Cependant, l'acquisition de la résistance à la verticilliose et de la résistance au nématode des tiges a probablement sauvé la culture de cette espèce et représente, sans doute, le fait marquant de cette sélection. Les problèmes de nématodes étaient particulièrement importants dans des régions telles que la Champagne où les luzernières étaient détruites dès la première année.

Ensuite, par une plus grande utilisation de la variabilité génétique, des progrès significatifs ont été obtenus dans la valeur alimentaire (teneur en protéines et prochainement digestibilité) et dans la tolérance au pâturage.

La lenteur du progrès génétique peut être, au moins en partie, imputée à l'auto-tétraploïdie de cette espèce qui ralentit l'identification des structures génétiques favorables.

Caractères importants améliorés

Rendement en biomasse. Le progrès a, certes, été limité, mais les variétés récemment inscrites présentent un rendement en matière sèche amélioré, par rapport à celui des variétés inscrites lors de l'ouverture du catalogue. Une partie de ce progrès est liée à l'amélioration de la résistance aux bio-agresseurs.

Résistances aux bio-agresseurs. De très importants progrès ont été réalisés dans l'acquisition de résistances aux maladies, en particulier :

- *la verticilliose* (*Verticillium albo-atrum*). Cette maladie fongique, apparue en France en 1974, provoque des pertes importantes pour la production de matière sèche. Les variétés résistantes limitent la progression de la maladie et constituent une excellente méthode de lutte ;
- *le nématode des tiges* (*Ditylenchus dipsaci*). Ce ravageur détruisait des luzernières, notamment en Champagne, et la découverte de variétés résistantes a sauvé la culture de cette plante dans les régions infectées ;
- *l'anthracnose* (*Colletotrichum trifolii*). Une sélection est en cours sur la résistance à ce champignon pathogène avec des premiers résultats très intéressants en terme de variétés inscrites.

Qualité alimentaire. Des progrès de l'ordre de 5 % (par rapport à 'Europe') ont été obtenus dans le taux de protéines. De même, la création de variétés à tiges fines a permis de proposer aux éleveurs des produits mieux ingérés, notamment par les petits ruminants (ovins et caprins). La digestibilité a, par ailleurs, été améliorée dans quelques variétés récentes. Le taux de saponines peut être notablement diminué par la voie génétique, mais cette possibilité a été peu valorisée.

Diversification. Des variétés adaptées au pâturage ont permis de diversifier l'usage de la luzerne. Ces variétés sont plus résistantes au piétinement et à la destruction de l'extrémité des bourgeons par le broutage des animaux grâce à

un port étalé. Par contre, elles ne réduisent pas le risque de météorisation. Cependant, une sélection spécifique pour la réduction du risque de météorisation a été conduite au Canada en recherchant une réduction de la vitesse initiale de dégradation. Les progrès sont limités et sont associés à une réduction sensible de la digestibilité de l'ensemble de la matière organique. Les travaux en vue de faire exprimer chez la luzerne des gènes de la voie de biosynthèse des tannins, qui permettraient un progrès en ce sens, n'ont pas abouti à ce jour.

Rendement grainier. Le rendement moyen de production de semences était de 2,3 q/ha en 1970 alors qu'il est maintenant de plus de 3,2 q/ha. Il faut néanmoins signaler que l'augmentation du rendement grainier est plus le fait de l'amélioration des pratiques culturales que de celui du potentiel grainier des variétés. Pourtant, des travaux récents ont montré la possibilité de progresser rapidement sur ce caractère avec des critères de sélection simples applicables à des plantes isolées.

Étalement de la production. Le printemps est la principale saison de production de la luzerne. Des variétés remarquables par leur capacité à croître pendant l'été et l'automne ont été sélectionnées et permettent de mieux étaler la production.

Facilité d'exploitation. Les progrès réalisés dans la réduction des risques de verse et l'amélioration de la finesse de la tige ont permis d'augmenter la récolte mécanique de plus de 10 %. Ces deux caractères sont, par ailleurs, totalement opposés et les variétés inscrites récemment constituent un bon compromis. On notera que les variétés françaises sont parmi les plus résistantes à la verse de toutes les obtentions au niveau mondial, en raison, d'une part, de l'importance de ce caractère pour les agriculteurs français compte-tenu de leurs pratiques agronomiques et, d'autre part, du poids de ce caractère lors de l'inscription des variétés au catalogue.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE Les caractères de résistance à la verticilliose et au nématode des tiges sont respectivement contrôlés par 1 et 1 à 2 gènes. Les allèles favorables ont été introduits dans de nombreuses variétés, mais la sélection s'est faite au sein du type « flamand » où les allèles favorables existaient avec une fréquence faible.
Mutagenèse induite	ESSAIS Des expériences de mutagenèse ont été tentées dans le but d'induire des stérilités mâles (<i>msr12</i>) pouvant être utilisées pour faire des hybrides F₁. Ces mutations n'ont eu aucune application commerciale.

suite...

... suite

Croisements
interspécifiques

OUI

M. sativa peut se croiser spontanément avec *M. falcata* et de nombreux échanges de gènes se sont produits entre ces deux espèces. Dans le catalogue européen, les variétés obtenues par croisement direct entre *M. falcata* et *M. sativa* sont classées sous l'appellation *Medicago* × *varia*.

Un certain nombre de variétés ont été sélectionnées dans des croisements entre *M. falcata* et *M. sativa*. C'est le cas de l'ancienne population 'Flamande' dans laquelle a été sélectionnée la variété 'Europe'. Malgré de nombreuses introgressions de *M. falcata*, elle est considérée comme appartenant à l'espèce *M. sativa*.

Hybridation somatique

ESSAIS

Des fusions de protoplastes et la régénération d'hybrides somatiques ont été réussies en France dans les années 1980 mais cela n'a pas débouché sur une création variétale.

Élévation du niveau
de ploïdie

ESSAIS

La luzerne est naturellement autotétraploïde. Les individus diploïdes sont très déprimés et les octoploïdes n'ont pas un intérêt supplémentaire par rapport à celui des tétraploïdes.

Transgénèse

1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur la luzerne au début des années 1990.

Essais au champ et commercialisation de variétés transgéniques. En 2000, 26 essais au champ de plantes de luzerne transgénique avaient été réalisés aux États-Unis. Malgré ces essais, il n'existe pas encore de variété transgénique de luzerne autorisée à la commercialisation dans le monde. Cela peut être, au moins en partie, expliqué par le fait qu'il est assez difficile de créer une variété transgénique lorsque la structure variétale est complexe (variété synthétique). Il faut, en effet, alors transformer l'ensemble des constituants de la variété. Une autre explication concerne l'importance des risques de dissémination vers des populations sauvages ou échappées de culture, voire vers des espèces compatibles.

Caractères améliorés par transgénèse. Un grand nombre de caractères ont déjà été introduits dans la luzerne par transgénèse, par exemple, la résistance à un herbicide (glyphosate), le taux d'acides aminés soufrés contenus dans les protéines, la tolérance aux sols contenant de l'aluminium, la persistance du feuillage, une meilleure digestibilité par modification de la teneur en lignine, une stérilité mâle nucléaire ou l'aptitude à la production d'anticorps monoclonaux.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative

OUI

La luzerne se multiplie végétativement facilement par bouturage. Cette technique est largement utilisée, notamment pour le maintien des composants de polycross. La luzerne est une des espèces modèles pour l'embryogenèse somatique. Elle est seulement appliquée, aux États-Unis de façon très marginale, à la multiplication des parents mainteneurs de variétés hybrides.

Sélection sanitaire

AUCUNE

Haploïdisation

ESSAIS

L'obtention de plantes haploïdes est possible (par croisements interspécifiques ou par culture d'anthères *in vitro*), mais n'est pas utilisée en sélection.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	ESSAIS Il existe de nombreuses stérilités mâles nucléaires récessives et au moins deux systèmes de stérilité mâle nucléo-cytoplasmique.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI L'allogamie chez cette espèce est, en partie, le fait d'une auto-incompatibilité partielle. Elle est essentiellement liée à l'avantage de l'allo-pollen.
Marquage moléculaire	OUI Des cartes génétiques ont été élaborées. Les marqueurs (AFLP, microsatellites) sont utilisés pour identifier le matériel et prochainement pour prédire la valeur des génotypes. Seuls quelques marqueurs de gènes d'intérêt ont été identifiés (résistance à l'oïdium).

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale Sélection de variétés synthétiques
Types variétaux	Variété population Variété synthétique ESSAIS Variété hybride de clones. L'effet d'hétérosis est important chez cette espèce (jusqu'à + 20 % de rendement en matière verte). Cependant, la production de semences des plantes mâles stériles est souvent trop faible pour être économiquement rentable. Il faut trouver des mainteneurs de stérilité pour multiplier les plantes mâles stériles à une échelle suffisante pour une production commerciale. De tels mainteneurs se trouvent assez facilement. Des variétés hybrides de luzerne ont été inscrites aux États-Unis grâce au développement des techniques d'embryogenèse somatique appliquées à la multiplication des parents mainteneurs de stérilité.

Perspectives d'amélioration

Même si les surfaces de luzerne ont notablement baissé en Europe depuis 20 ans, cette Légumineuse fourragère reste une plante importante en Europe et dans de très nombreux autres pays. La luzerne est une espèce ayant une réelle valeur agronomique (fixation symbiotique, excellente tête de rotation, préservation des sols et lutte contre l'érosion) et nutritionnelle (teneur en protéines, richesse en minéraux assimilables, lutte contre l'acidose) pour les ruminants. Néanmoins, elle souffre de certaines limites majeures comme sa faible valeur énergétique, sa pérennité limitée comparée à celle d'autres espèces fourragères et les difficultés de récolte puisqu'elle n'est utilisée qu'en foin ou en déshydratation.

Les principaux pays impliqués aujourd'hui dans l'amélioration génétique de la luzerne sont les États-Unis, le Canada, le Brésil, l'Europe de l'Ouest (avec surtout la France), quelques pays d'Europe de l'Est (Hongrie, Pologne, Tchéquie, etc.) et l'Australie.

Cette espèce verra son intérêt s'accroître chaque fois que les préoccupations environnementales vont augmenter, et décroître si l'on ne parvient pas à augmenter la quantité et à améliorer la qualité du fourrage récolté et séché. Ceci passe par une amélioration continue de la résistance aux bio-agresseurs (en particulier, l'anthracnose, parasite en expansion en France à la faveur des étés chauds et humides) et par une amélioration de la digestibilité, en améliorant la tenue des feuilles. Ceci ne se fera pas uniquement par la voie génétique, puisque les techniques de récolte permettent d'améliorer de façon considérable la qualité du produit récolté.

En Europe, les nouvelles orientations de la recherche portent notamment sur l'amélioration de la digestibilité car celle-ci permettrait d'utiliser davantage la luzerne dans l'alimentation des vaches laitières à haute performance. La recherche de variétés aptes à la pâture est également une préoccupation pour plusieurs sélectionneurs.

Au cours des dix dernières années, l'effort d'innovation variétale a sensiblement baissé. Cependant, il faut noter une montée en puissance remarquable de la recherche en génomique sur *Medicago truncatula* Geartn., légumineuse modèle, génétiquement très proche de *M. sativa*. La luzerne cultivée pourra donc bénéficier des avancées de cette recherche.

Caractères à améliorer

Qualité

Digestibilité. Différentes voies permettent l'amélioration de la digestibilité du fourrage. Il y a, d'une part, l'augmentation du rapport feuilles/tiges, les feuilles étant plus digestibles que les tiges et, d'autre part, l'amélioration de la digestibilité des tiges qui peut être obtenue par une réduction de la teneur en parois cellulaires et de la teneur en lignines. Les différentes composantes de la digestibilité peuvent être améliorées grâce à l'utilisation de nouveaux outils de mesure (prédiction par spectrométrie dans le proche infra-rouge) et en s'appuyant sur la connaissance des bases physiologiques de la digestibilité et de l'histologie des tiges.

Taux de saponines. La luzerne contient des saponines (1,5 % de la matière sèche). Les saponines, dont l'acide médicagénique, sont des glycosides qui ont un effet hypocholestérolémiant chez l'Homme. Des gélules contenant des extraits foliaires de luzerne sont vendues en pharmacie pour lutter contre le cholestérol.

À l'opposé, il serait très intéressant de diminuer la teneur en saponines pour l'alimentation des monogastriques. En effet, en raison de son action hypocholestérolémiante, l'acide médicagénique est un facteur anti-appétent, antinutritionnel et qui peut même être létal chez les monogastriques très jeunes comme le poulet. La présence de cette substance limite l'utilisation des bouchons de luzerne à hauteur de 5 % pour l'alimentation de ces animaux. L'existence dans la variabilité naturelle d'individus sans saponine et d'autres pour lesquels 6 %

de la matière sèche des feuilles est composée de saponines, laisse entrevoir de multiples possibilités.

Météorisation. Le risque de météorisation est le principal facteur qui limite l'usage du pâturage intensif de la luzerne pour l'alimentation des ruminants. Il serait intéressant de sélectionner des variétés ne provoquant pas de météorisation.

Teneur en lignine. La lignification des parois cellulaires diminue la digestibilité de la luzerne, réduit drastiquement les performances animales et occasionne d'importantes pertes économiques. La lignine vient en effet se déposer dans la paroi pecto-cellulosique des cellules mûres ayant fini leur élongation. Elle rend la cellule rigide, mais pas imperméable. La molécule de lignine présente de nombreux ponts (notamment grâce à deux composés, l'acide *p*-coumarique et l'acide férulique) avec les autres composés de la paroi, notamment les hémicelluloses, ce qui limite la digestibilité de ceux-ci par les ruminants. La lignine est, quant à elle, totalement indigestible par les ruminants. La teneur en lignine augmentant avec la maturité, elle réduit ainsi la digestibilité de la matière végétale, ce sont donc les jeunes plantes qui servent à nourrir les animaux. La transgénèse est utilisée aux États-Unis pour réduire cette teneur.

Techniques à développer

Croisements intraspécifiques. La variabilité génétique est très importante chez cette espèce, ce qui laisse des bons espoirs d'amélioration par la réalisation de simples croisements intraspécifiques. Il faut, par une analyse exhaustive de la diversité génétique pour des caractères phénotypiques et des caractères moléculaires, améliorer la connaissance de la variabilité génétique disponible et déterminer *a priori* les croisements les plus pertinents. Une réflexion est aussi menée sur la possibilité de valoriser l'hétérosis en définissant et en construisant des groupes d'aptitude à la combinaison. *M. sativa* et *M. falcata* apparaissent comme deux groupes générant, au niveau des hybrides entre eux, une hétérosis importante.

Marquage moléculaire. Le marquage moléculaire va se développer en bénéficiant des travaux menés sur l'espèce modèle diploïde *Medicago truncatula*. Elle pourrait être utilisée en vue, d'une part de faire de la sélection assistée par marqueurs, en particulier pour des résistances aux maladies et, d'autre part de préciser la caractérisation génétique des variétés qui est difficile et constitue un facteur limitant majeur pour la distinction variétale, lors de l'inscription des variétés au catalogue national (test DHS).

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue plantes fourragères avec création des listes A et B.

En 2004, 59 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français (dont 55 en liste A) et 330 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 3 années. À l'issue de ces 3 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. Ainsi, la variété est testée pendant 3 ans dans un réseau national d'essais agronomiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Deux variétés choisies parmi les plus multipliées constituent les témoins de référence pour le rendement et la valeur agronomique. Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le CTPS a introduit, à partir des implantations de 2004, le critère de digestibilité dans les critères d'évaluation des variétés. Cette mesure incite les semenciers à proposer des variétés plus digestibles.

Pour en savoir plus

Barnes D.K., 1993. La luzerne. Dans : *Méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. Éditions OCDE, Paris, 149-159.

Bellucci M., Alpini A. et Arcioni S., 2002. Zein accumulation in forage species (*Lotus corniculatus* and *Medicago sativa*) and co-expression of the gamma-zein : KDEL and beta-zein : KDEL polypeptides in tobacco leaf. *Plant Cell Rep.*, 20 (9), 848-856.

Bolanos-Aguilar E.D., Huyghe C., Ecalle C., Hacquet J. et Julier B., 2002. Effect of cultivar and environment on seed yield in alfalfa. *Crop Sci.*, 42 (1), 45-50.

Bradner N.R. et Childers W.R., 1968. Cytoplasmic male sterility in alfalfa. *Can. J. Plant Sci.*, 48, 111-112.

Brouwer D.J. et Osborn T.C., 1999. A molecular marker linkage map of tetraploid alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 99 (7/8), 1194-1200.

Dattée Y., 1975. Facteurs génétiques liés à l'auto- et interfertilité chez la luzerne. *Ann. Amélior. Plant.*, 26 (3), 419-441.

Demarly Y., 1963. Génétique des tétraploïdes et amélioration des plantes. *Ann. Amélior. Plant.*, 13, 307-408.

- D'Halluin K., Botterman J. et de Greef W.**, 1990. Engineering of herbicide-resistant alfalfa and evaluation under field conditions. *Crop Sci.*, 30 (4), 866-871.
- Echt C.S., Kidwell K.K., Knapp S.J., Osborn T.C. et McCoy T.J.**, 1994. Linkage mapping in diploid alfalfa (*Medicago sativa*). *Genome*, 37, 61-71.
- Émile J.-C. et Traineau R.**, 1993. Effet de la variabilité génétique sur la digestibilité *in vivo* de la luzerne. *Fourrages*, 134, 251-254.
- Génier G., Guy P. et Prosperi J.-M.**, 1992. Les luzernes. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannetot, éd., INRA Éditions, Paris, 323-338.
- GNIS**, 2000. L'amélioration des plantes fourragères. Dans : *Collection agriculture et sélection végétale*. Cédérom. Édition GNIS, Paris.
- Guines F., Julier B., Ecalte C. et Huyghe C.**, 2003. Among and within-cultivar variability for histological traits of lucerne (*Medicago sativa* L.) stem. *Euphytica*, 130 (2), 293-301.
- Guo D., Chen F., Wheeler J., Winder J., Selmans S., Peterson M. et Dixon R.A.**, 2001. Improvement of in-rumen digestibility of alfalfa forage by genetic manipulation of lignin O-methyltransferases. *Transgenic Res.* 10 (5), 457-464.
- Hill K.K., Jarvis-Eagan N., Halk E.L., Krahn K.J., Liao L.W., Mathewson R.S., Merlo D.J., Nelson S.E., Rashka K.E. et Loesch-Fries L.S.**, 1991. The development of virus-resistant alfalfa, *Medicago sativa* L. *Biotechnology*, 9, 373-377.
- Huyghe C.**, 2002. 40 ans d'amélioration des espèces fourragères pérennes : acquis et perspectives. *Sél. Fr.*, 53, 41-54.
- Huyghe C.**, 2005. *Prairies et cultures fourragères en France : entre logiques de production et enjeux territoriaux*. INRA Éditions, Paris, 224 p.
- Julier B., Guines F., Émile J.-C. et Huyghe C.**, 2003. Variation in protein degradability in dried forage legumes. *Anim. Res.*, 52 (5), 401-412.
- Julier B., Huyghe C. et Ecalte C.**, 2000. Within- and among-cultivar genetic variation in alfalfa : forage quality, morphology and yield. *Crop Sci.*, 40, 365-369.
- Khoudi H., Laberge S., Ferullo J.-M., Darveau A., Castonguay Y., Allard G., Lemieux R. et Vezin L.-P.**, 1999. Production of a diagnostic monoclonal antibody in perennial alfalfa plants. *Biotechnol. Bioeng.*, 64 (2), 135-143.
- Luciani A.**, 2004. La luzerne. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 155-161.
- Obert D.E., Skinner D.Z. et Stuteville D.L.**, 2000. Association of AFLP markers with downy mildew resistance in autotetraploid alfalfa. *Mol. Breed.*, 6 (3), 287-294.
- Moule C.**, 1980. *Fourrages*. La Maison rustique, Paris, 302 p.
- RAGT**, 1999. *Le memento de l'herbe*. Document RAGT, Rodez, 53 p.
- Riday H. et Brummer E.C.**, 2002. Forage yield heterosis in alfalfa. *Crop Sci.*, 42, 716-723.
- Rosellini D., Pezzoti M. et Veronesi F.**, 2001. Characterization of transgenic male sterility in alfalfa. *Euphytica*, 118 (3), 313-319.
- Téoulé E. et Dattée Y.**, 1987. Recherche d'une méthode fiable de culture de protoplastes, d'hybridation somatique et de régénération chez *Medicago*. *Agronomie*, 7, 575-584.
- Tesfaye M., Vance C.P., Allan D.L. et Samac D.A.**, 2000. Aluminium tolerance in transgenic alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Proc. Am. Forage Grassl. Counc.*, 6, 306.

Le maïs

Zea mays L. subsp. *mays* ($2n = 2x = 20$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation de l'espèce

Plusieurs théories se sont opposées quant à l'origine du maïs, mais on considère aujourd'hui, qu'un téosinte¹ (*Zea mays* L. subsp. *mexicana* (Schrad.) H. H. Iltis) d'Amérique centrale est l'ancêtre du maïs cultivé. Cette proposition, avancée par G.W. Beadle dans les années 1930, à partir de l'étude génétique de la descendance d'hybrides entre les deux espèces, a été confirmée par la comparaison moléculaire de leurs génomes. Le téosinte est une graminée tropicale spontanée à fort tallage qui a de nombreux petits épis sans rachis. Des mutations peu nombreuses auraient affecté le développement végétatif pour réduire le nombre de tiges (absence de tallage) et la structure de l'épi pour aboutir à une forme compacte où les grains sont disposés sur plusieurs rangées et attachés fermement à une rafle. De ce fait, les graines ne peuvent être spontanément disséminées d'autant plus que l'épi, à maturité, reste enveloppé dans des feuilles particulières, les spathes. Le téosinte, qui peut être pollinisé par le maïs, n'existe pas en France à l'état spontané. Les premières traces du maïs, *Zea mays* L. subsp. *mays* trouvées en Amérique centrale, sont antérieures à 5 000 ans av. J.-C. Le maïs a été une plante très cultivée par les Aztèques, les Incas et les Mayas pour la récolte de ses grains, destinés à l'alimentation humaine. Il a été rapporté des Caraïbes par Christophe Colomb en 1493 et cultivé en Andalousie. Ces premiers maïs étaient de type « corné » (cf. p. 410). Par ailleurs, des analyses moléculaires combinées à une approche historique ont récemment permis de confirmer l'hypothèse d'une deuxième introduction en Europe de matériel originaire du nord de l'Amérique du type *Northern Flint* (« corné du Nord ») dès la première moitié du XVI^e siècle. Il a fallu attendre le XIX^e siècle pour que les premiers maïs de type « denté » (cf. p. 410) soient importés d'Amérique du Nord en Europe. Ces introductions successives ont eu lieu d'abord pour une production de grain destinée à l'alimentation humaine, l'utilisation intensive du

¹ Téosinte est un nom masculin, bien que dans beaucoup d'ouvrages, on le trouve au féminin.

grain pour l'alimentation du bétail étant le fait de sociétés riches et « développées ». La culture du maïs en France, qui était très répandue au milieu du XIX^e siècle avec 800 000 ha, a connu une diminution jusqu'à environ 300 000 ha vers 1930. Dans les années 1960-1970, grâce à la création de variétés hybrides précoces, la culture du maïs s'est développée jusqu'à la Région parisienne, pour atteindre actuellement 3 millions d'hectares.

Le maïs est une espèce annuelle, monoïque et protandre, multipliée par semences. L'allogamie est prépondérante bien que la plante soit autofertile. Le maïs est une espèce qui ne peut se multiplier en conditions naturelles sans l'intervention humaine et qui, par conséquent, n'existe pas à l'état sauvage.

Comme de nombreuses graminées tropicales, le maïs dispose d'un métabolisme carboné particulier (type C4) qui se traduit, au cours de la photosynthèse, par une très grande capacité à fixer le gaz carbonique, donc par une forte aptitude à la production de biomasse.

On a distingué plusieurs types de maïs, classés en sous-espèces, qui diffèrent, notamment, selon l'importance relative de l'aspect vitreux ou farineux de la texture de l'albumen dans le même grain. Les principaux types sont :

- le type « corné » (*flint corn*), *Zea mays* var. *indurata* (Sturtev.) L.H. Bailey, dont le grain, bombé dans sa partie apicale, a une texture dure, cornée. L'albumen est vitreux en majorité dans la couche externe du grain et l'albumen interne est farineux. C'est le cas de la majorité des variétés populations françaises et d'Europe de l'Ouest ;
- le type « denté » (*dent corn*), *Z. mays* var. *indentata* (Sturtev.) L.H. Bailey, dont le grain présente, à maturité, une dépression dans sa partie axiale, d'où son nom. Ici, seules les faces latérales de l'albumen sont à structure vitreuse et la zone axiale a une texture farineuse qui se rétracte à maturité. C'est le type le plus répandu aux États-Unis et au nord du Mexique ;
- le type « à éclater » (ou *pop-corn*), *Z. mays* var. *evarta*, dont le grain est petit et pointu. L'albumen est presque exclusivement constitué d'amidon vitreux. Il est surtout cultivé aux États-Unis ;
- le type « doux » ou « sucré » (*sweet corn*), *Z. mays* var. *saccharata* (Sturtev.) L.H. Bailey, dont le grain est très ridé et translucide. Son albumen ne contient pas d'amidon, mais des amyloextrines ;
- le type cireux (ou gluant ou visqueux) (*waxy* ou *soft corn*), *Z. mays* var. *ceratina*, qui doit ce qualificatif à l'aspect cireux du grain. Son amidon est composé d'amyloextrines uniquement. Il permet de produire un amidon comparable à celui du tapioca, utilisé pour épaissir les gelées de fruits ou dans les industries textile et papetière.

Chez le maïs, la diversité génétique naturelle est exceptionnelle. L'importance de cette diversité est sans doute due en partie au fait que le maïs a pu garder, au cours de son évolution, la faculté d'échanger du matériel génétique avec le téosinte. Par ailleurs, le séquençage des allèles d'un certain nombre de gènes a

montré des différences en moyenne tous les 20 nucléotides. Enfin, les transposons et rétrotransposons sont également en partie responsables de cette diversité, sachant qu'ils représentent 80 % du génome et que leur mobilité entraîne des mutations ou des modifications de l'expression des gènes.

La diversité génétique caractérisée, conservée et accessible est importante. Des mesures ont été prises par des instances privées et publiques pour maintenir cette diversité à un niveau assez large. En France, l'étude des populations à l'aide de marqueurs moléculaires permet de bien connaître la variabilité et donc de la protéger. Des opérations de sauvetage conduites en 1947-48, notamment par l'INRA dans les Pyrénées et dans le sud du Massif central, ont permis de sauver les variétés locales assez nombreuses qui représentent assez bien les maïs précoces traditionnels. Celles-ci figurent dans les banques de gènes d'aujourd'hui. Ces premières prospections ont été faites avant le développement des variétés hybrides entre 1955 et 1965.

Puis, des opérations ont été poursuivies à partir de 1983, avec le Programme Populations Sources, mené par PROMAÏS et l'INRA, et avec la mise en place d'un dispositif permanent de maintien, de multiplication et de conservation des populations. Au niveau mondial, le maintien des ressources génétiques de maïs (plus de 15 000 entrées) est assuré par le CIMMYT (Mexique).

Pour faciliter leur gestion et préparer leur utilisation, les ressources génétiques du maïs sont classées en groupes hétérotiques (par exemple, corné européen, denté nord-américain...), c'est-à-dire des groupes qui se combinent bien entre eux et tels qu'en croisant une lignée issue d'un groupe avec une lignée issue de l'autre groupe, l'hybride obtenu est de bon niveau.

Production et utilisation

Le produit récolté est, soit la plante entière avant maturité complète (au stade pâteux) dans le cas du « maïs fourrage », soit le grain mûr dans le cas du « maïs grain ». Le grain de maïs est un caryopse (fruit sec indéhiscant) constitué d'une graine et de téguments.

Le maïs est la plante la plus cultivée dans le monde pour l'alimentation directe ou indirecte de l'homme, avec une production mondiale de 721 millions de tonnes sur une surface de 147 millions d'hectares. La France a produit, à elle seule, en 2004, plus de 16 millions de tonnes de maïs grain sur une surface de 1,65 million d'hectares (données FAO, 2004). La surface consacrée en France au maïs fourrage était de 1,45 million d'hectares en 2004. En Europe, le maïs est destiné à l'alimentation animale sous forme de maïs grain ou d'ensilage pour 75 %, à l'amidonnerie pour 20 % et à la semoulerie pour 5 %, avec des fluctuations importantes d'une année à l'autre.

Alimentation animale. L'utilisation du maïs comme plante fourragère pour l'alimentation des ruminants est relativement récente : elle est signalée en 1789

par A. Parmentier comme « une plante que l'on peut utiliser en prairie momentanée », tandis que les premiers essais d'ensilage de maïs ont été réalisés en Sologne en 1852. Sous cette forme, le maïs sert essentiellement à l'alimentation bovine. Les avantages du maïs pour l'ensilage sont nombreux : il a une productivité élevée et une valeur énergétique plus élevée que celle de l'herbe. De plus, la fabrication de l'ensilage est plus facile que dans le cas d'un ensilage d'herbe avec une meilleure conservation.

Le maïs grain peut être utilisé directement pour l'alimentation aviaire et porcine ou peut être transformé pour la fabrication d'aliments du bétail. Le grain jaune diffère du grain blanc par la teneur en carotène et cette caractéristique détermine l'usage en alimentation des volailles suivant la couleur, blanche ou jaune, recherchée pour la chair ou le foie gras. Cependant, le grain de maïs a quelques défauts comme sa faible teneur en protéines (10 %) et son manque d'acides aminés essentiels (tryptophane et lysine) qui rendent obligatoire l'addition de compléments protéiques.

Alimentation humaine. Dans les pays en voie de développement, le maïs constitue souvent l'aliment de base. Une petite fraction de la production française de maïs (521 000 tonnes) (données Agreste, 2004) est utilisée en France directement pour la nutrition humaine. Il s'agit essentiellement de maïs doux destiné, pour une petite partie, au marché du frais, et pour la majorité, à l'appertisation et à la surgélation. Cette utilisation limitée est notamment due à des habitudes culturelles. Après une progression importante dans les dix dernières années (bien que le maïs doux ne représente que quelques milliers d'hectares en France, 28 000 ha en 2004), on note une certaine baisse des surfaces. Par ailleurs, on peut signaler que le maïs à éclater y est cultivé de façon marginale. Le maïs est aussi consommé en France sous forme de *corn flakes* et de polenta. Dans des pays comme le Portugal, il entre aussi dans la composition du pain.

Environ 25 % de la production est destinée aux industries qui transforment le maïs en produits alimentaires ou non. La semoulerie, qui sépare l'amidon farineux du germe, produit des farines spéciales, des semoules, des flocons, *corn flakes*, etc., à partir de l'amidon et une huile riche en vitamines E et F à partir du germe. L'amidonnerie transforme l'amidon, par hydrolyse, en divers produits (souvent sous forme de sirop) avec le glucose comme terme ultime. Ce dernier est utilisé en biscuiterie, confiserie, pharmacie, etc.

Industrie non alimentaire. L'amidon a de nombreuses applications industrielles : éthanol, colles industrielles, textiles, papiers, boues de forage pour le pétrole, matières plastiques biodégradables, etc.

Histoire des variétés cultivées en France

La diversité des conditions de température en France est à l'origine de populations de précocités différentes, adaptées à ces différentes conditions. De même, les variétés hybrides sont classées en groupes de précocité de maturité définis, à

partir de 2000, par un indicateur climatique de besoin en degrés Celsius $\times$ jours (6 °C étant la température minimale) pour la période comprise entre le semis et le stade de maturité physiologique du grain (32 %). On distingue :

- les variétés très précoces, dont les besoins en degrés $\times$ jours (°C $\times$ jours) sont inférieurs à 1 700 ;
- les variétés précoces, où ils sont compris entre 1 680 à 1 740 °C $\times$ jours ;
- les variétés semi-précoces de type corné-denté, où ils sont compris entre 1 740 et 1 800 °C $\times$ jours ;
- les variétés semi-précoces de type denté, où ils sont compris entre 1 800 et 1 870 °C $\times$ jours ;
- les variétés semi-tardives, où ils sont compris entre 1 870 et 1 940 °C $\times$ jours ;
- les variétés tardives, où ils sont compris entre 1 940 et 2 015 °C $\times$ jours ;
- les variétés très tardives, où ils sont compris entre 2 015 et 2 090 °C $\times$ jours.

Avant 1947, seules des variétés populations locales étaient cultivées en France. Puis, des variétés hybrides nord-américaines furent introduites et inscrites au catalogue officiel français en 1953, compte tenu de leurs performances de rendement systématiquement supérieures dans les essais. Cependant, pour la culture et la commercialisation, ces variétés hybrides nord-américaines ne se sont pas montrées toujours adaptées aux conditions françaises, avec, en particulier, une tolérance insuffisante aux températures fraîches et des difficultés de séchage du grain. Les variétés hybrides françaises issues du croisement entre lignées nord-américaines et lignées européennes, diffusées à partir de 1957, ont rapidement remplacé les populations.

Ces hybrides étaient au début des hybrides doubles ou des hybrides trois voies (cf. « Types variétaux », p. 424), avec toujours le parent femelle originaire d'un groupe hétérotique et le mâle d'un autre groupe. En effet, la dépression de consanguinité au niveau de la lignée prise comme parent femelle ne permettait pas de produire un hybride simple, structure hybride idéale pour bien utiliser le phénomène d'hétérosis ; le parent femelle était donc un hybride simple de lignées d'un même groupe hétérotique. Ce n'est que quelques dizaines d'années plus tard, après l'effet de la sélection sur la vigueur des lignées, que le ou les parents hybrides simples ont pu être remplacés par une lignée.

Le matériel génétique dont disposent actuellement les sélectionneurs résulte d'un long effort de sélection pour la productivité en grain. Depuis 1970, le maïs ensilage n'a cessé de se développer et l'on trouve, actuellement, des variétés très typées grain, des variétés mixtes et des variétés à vocation ensilage.

Variétés populations françaises

Elle sont toutes à grain de type corné.

'Étoile de Normandie', complexe de populations précoces à grain jaune et à tallage abondant. Cette population perdue dans les années 1960 était, semble-t-il, la seule en France, à avoir une destination majoritairement fourragère (fourrage vert, non ensilé).

‘Jaune d’Alsace’, variétés populations précoces à grain jaune et à tallage abondant.

‘Hâtif d’Auxonne’, variété population surtout cultivée en Bresse et en Bourgogne dont les plantes mesuraient 1,50 m.

‘Blanc des Landes’ ou **‘Blanc de Chalosse’**, variété population de précocité moyenne à grain blanc, cultivée en Aquitaine et dans les Basses-Pyrénées.

‘Doré des Landes’ variété population de précocité moyenne à grain jaune.

‘Grand Roux Basque’, variété population tardive à grain roux, cultivée dans la basse vallée de l’Adour. Les plantes étaient de grande taille. Cette population était très sensible à *Gibberella zeae*, champignon qui émet un produit toxique pour les animaux.

‘Millette du Lauragais’, variété population tardive à petit grain blanc, cultivée dans la vallée de la Garonne. Les plantes avaient une taille de 2,20 m environ.

‘Millette de Finhan’, variété population tardive à très petit grain pointu et roux. Cette variété, dont les plantes pouvaient atteindre 2,30 m, était cultivée dans le Tarn-et-Garonne.

‘Lacaune’, provenance ou isolat composé de maïs cultivés pour le fourrage vert dans une exploitation agricole : La Capte, aujourd’hui disparue, située sur la commune d’Anglès (Tarn), au pied des monts de Lacaune. C’est à partir de la collecte effectuée dans cette provenance en 1947, qu’ont été créées les lignées F2 et F7.

Variétés hybrides

1924, **‘Redgreen’**, première variété de maïs doux. C’est une variété nord-américaine.

1948 : première introduction de variétés hybrides de maïs originaires des États-Unis. Elles ont été inscrites au catalogue officiel français en 1951. Parmi elles :

– **‘W 240’** (université du Wisconsin, États-Unis), variété hybride double précoce, de type denté à grain jaune.

– **‘W 255’** (WD × W9) (WH × WJ) (université du Wisconsin, États-Unis), variété hybride double semi-précoce, de type denté à grain jaune ;

– **‘U 22’** (United, États-Unis), variété hybride double semi-tardive, de type denté à grain jaune ;

– **‘W 355’** (université du Wisconsin, États-Unis), variété hybride double semi-tardive, de type denté à grain jaune ;

– **‘W 416’** (université du Wisconsin, États-Unis) variété hybride double semi-tardive, de type denté à grain jaune ;

– **‘Iowa 4417’** (université de l’Iowa, États-Unis), variété hybride double tardive, de type denté à grain jaune. Cette variété nord-américaine, introduite en France dès la fin de la seconde guerre mondiale (en 1946 ou 1947), est celle qui était la plus cultivée en 1959 pour la production de maïs grain.

F2 et F7, deux lignées d'exception

En 1940, un éleveur d'Anglès (Tarn) repère dans un de ses champs, semé avec des graines achetées à l'épicerie du village, deux épis de maturité correcte, ce qui était exceptionnel dans cette exploitation d'altitude (720 m) aux températures fraîches. Durant les 7 années suivantes, l'agriculteur a réalisé une sélection massale pour la tolérance au froid, en sélectionnant les meilleurs épis parvenus à maturité pour le semis de la génération suivante. Il est ainsi à l'origine de la provenance 'Lacaune'. C'est alors que R. de Larambergue, chargé de l'amélioration de l'avoine à l'INRA, originaire de ce village, apporta un sachet de graines de cette provenance à A. Cauderon, chargé de l'amélioration du maïs à l'INRA, qui commençait alors à réunir des populations européennes. Semée à l'INRA de Versailles (Yvelines) en 1947, cette provenance a ensuite été sélectionnée et l'intérêt de deux de ses lignées, F2 et F7, a été mis en évidence lors des épreuves de valeur hybride avec des testeurs. Les deux lignées furent incluses en 1952-53 dans des échanges organisés entre quelques laboratoires publics européens, de même que la lignée Ep1 de la Mission biologique de Galice à Pontevedra (Espagne). Les qualités exceptionnelles de l'hybride F7 × F2 comme partenaire de lignées nord-américaines ont ensuite été mises à profit par la création de variétés hybrides, doubles, puis trois voies, tolérantes au froid et assez homogènes. Ces deux lignées ont donc contribué de manière radicale à l'amélioration du maïs précoce. L'une des deux, F2, est la lignée de type corné qui a été utilisée comme parent dans la quasi-totalité des variétés hybrides françaises pendant trente ans. En 1990, 85 % des semences de variétés précoces ou semi-précoces, qui étaient commercialisées, contenaient la lignée F2 parmi leurs géniteurs. La lignée F2 n'est plus utilisée dans les variétés récemment inscrites au catalogue. Cependant, certaines lignées de type corné utilisées pour la réalisation de variétés hybrides actuelles, ont encore parfois cette lignée F2 dans leur généalogie.

1957, '**INRA 200**' (WH × WJ)(F7 × F2) (INRA, France), première variété française de maïs hybride. C'est un hybride double construit sur le modèle adopté pour la majorité des variétés hybrides commercialisées en France, c'est-à-dire le croisement entre des lignées d'origine nord-américaine (type denté) avec des lignées européennes (type corné). Cette variété possède la lignée F2 dans ses constituants (*cf.* encadré ci-dessus). C'est une variété précoce à grain jaune, de type corné-denté.

1958, '**INRA 258**' (F115 × W33)(F2 × Ep1) (INRA, France), variété hybride double précoce qui a permis l'extension de l'aire de culture du maïs en France, grâce à sa précocité et sa tolérance aux basses températures. Entre 1960 et 1970, cette variété de type corné × denté a occupé plus des trois quarts de la surface cultivée en maïs au nord de la Loire. L'un de ses parents, Ep1, lignée provenant de la Mission biologique de Galice à Pontevedra (Espagne), est un bel exemple de la coopération européenne de l'époque.

1960, '**Funk G 75 A**' (Funk, États-Unis), variété hybride double tardive, de type denté.

1960, '**INRA 260**' (INRA, France), variété hybride 3 voies de type corné × denté assez homogène qui a été diffusée largement en France. L'absence d'accidents d'« homogénéité excessive » qu'on pouvait craindre a encouragé les sélectionneurs à développer les hybrides simples. Par ailleurs, c'est la première variété

hybride précoce, très productive dans les conditions de la moitié sud de la France. Elle a permis aux agriculteurs, notamment dans les Landes, d'atteindre des rendements élevés sans recourir aux variétés hybrides très tardives qu'on ne peut récolter que très tard en saison.

1960, '**INRA 640**' (INRA, France), variété hybride double tardive, de type denté.

1960, '**U 32**' (United, États-Unis), variété hybride double tardive, de type denté.

1960, '**W 690**' (université du Wisconsin, États-Unis) variété hybride double tardive, de type denté.

1961, '**Illini Chief**' ou '**Illini Xtra Sweet**' (États-Unis), première variété porteuse de la mutation *sh2* conférant au maïs doux une agréable saveur très sucrée. Cette variété nord-américaine de maïs « super doux » (*supersweet*) (non cultivée en France) était un hybride 3 voies.

1964, '**Dekalb 640**' (Dekalb USA, États-Unis), première variété utilisant des lignées issues d'haplométhode et qui ait connu un succès commercial. Cette variété, cultivée aux États-Unis, était un hybride double très tardif de type denté.

1967, '**INRA 400**' (INRA, France), variété hybride double de type corné × denté dont la production de semences était basée sur l'utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « Texas ».

1970, '**LG11**' (Limagrain, France), variété hybride 3 voies, de type corné × denté, présentant un gain important en rendement en raison de son adaptation à de fortes densités de semis ; elle a conduit à un succès commercial.

1976, '**Albin INRA 311**' (INRA, France), variété hybride double à grain blanc de type corné × denté destiné aux gavage des palmipèdes.

1979, '**Montblanc**' (INRA, France), variété hybride trois voies semi-tardive pouvant être produite à l'aide de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique C et de la restauration de la fertilité.

1980, '**Dea**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple, semi-précoce entre une lignée semi-précoce de type denté et la lignée F2. Cette variété de type corné × denté, était bien plus productive que les autres variétés de l'époque, ce qui lui a valu un succès commercial exceptionnel.

1981, '**Eva**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple, précoce, de type corné × denté, possédant un bon rendement en grain.

1986, '**Challenger**' (Asgrow France, France), variété utilisée pour produire du maïs doux de type superdoux. Elle possède le gène *sh2*.

1987, '**Volga**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple, tardive, de type corné × denté, possédant un bon rendement en grain.

1990, '**DK 300**' (Soccalb, France), variété hybride simple, semi-précoce, de type corné × denté ayant apporté un gain de rendement de l'ordre de 10 % par rapport aux variétés inscrites à l'époque. L'originalité de cette variété est d'avoir du matériel de type denté introgressé dans le parent mâle, alors que celui-ci est classiquement de type corné dans ce groupe de maturité.

1992, '**Cecilia**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple, tardive de type denté, possédant un bon rendement en grain.

1992, '**Banguy**' (Nickerson SA, France), variété hybride simple, précoce, de type corné × denté apportant un gain en productivité. Cette variété est, de plus, très rustique, avec de bonnes performances que ce soit en grain ou en ensilage. Toutes ces qualités lui ont permis de connaître un certain succès en Europe du Nord.

1992, '**Lucilla**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple de maïs à grain blanc de type denté destinée au gavage des palmipèdes.

1993, '**Dunia**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple semi-tardive de type denté, possédant un bon rendement en grain, et qui a connu un succès commercial.

1994, '**Anjou 285**' (Limagrain Genetics Fr, France), variété hybride simple précoce de type corné × denté, apportant un gain en productivité et ayant connu un bon succès commercial. Ce gain de productivité a été obtenu grâce à un changement de structure physiologique : la floraison tardive est associée à une dessiccation rapide du grain.

1996, '**Anjou 258**' (Limagrain Genetics Fr, France), variété hybride trois voies de type corné × denté, ayant un bon rendement grain et ensilage. Elle convient bien pour le maïs fourrage car elle produit un ensilage riche en UFL.

1997, '**DK 312**' (Dekalb USA, États-Unis), première grande variété hybride de type « denté pur » à être cultivée dans les zones au nord de la Loire, traditionnellement réservées au type corné × denté.

1997, '**Openstar Faune**' (Limagrain Genetics Fr, France), variété hybride trois voies de type corné × denté destinée à la jachère à gibier. Le grain est de couleur rouge, donc le produit de la récolte n'est pas commercialisable.

1998, '**Bacchus**' (SES Europe, Belgique), variété hybride simple, semi-précoce, de type corné × denté, se caractérisant par sa régularité et son très bon potentiel de rendement.

1998, '**Furio Cb**' (Novartis Seeds France, France), variété hybride simple de maïs transgénique (de type denté) qui contient une résistance à la pyrale (événement Bt 176). C'est une version modifiée (résistante à la pyrale) de la variété 'Furio'. Elle a été inscrite au catalogue officiel français en 1998, comme 14 autres variétés transgéniques résistantes à la pyrale (événements Mon 810 ou Bt 176). Elle n'a pas été cultivée depuis l'établissement d'un moratoire de fait sur la culture des OGM en France.

1999, '**Centéna**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple semi-précoce de type denté, se caractérisant par un bon rendement grain et un bon comportement en ensilage.

1999, '**Panawax**' (Maïsadour Semences, France), variété hybride simple, dont le grain de type cireux est destiné à l'amidonnerie. Cette variété est la version à

grain cireux de la variété 'Panama' à grain denté inscrite en 1998. 'Panawax' a été inscrite seulement un an après, grâce à des rétrocroisements assistés par marqueurs moléculaires.

2000, '**PR39G12**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride simple très précoce de type corné × denté, se caractérisant par un bon rendement grain et un bon comportement en ensilage.

2000, '**Lexxor**' (Dekalb USA, États-Unis), variété hybride simple de type denté se distinguant notamment par sa tolérance à un herbicide, la cycloxydime. Elle a été obtenue par sélection de variants somaclonaux dans des cultures d'embryons *in vitro* de la variété 'DK 312'.

2000, '**Energetic**' (Verneuil Recherche, France), variété hybride simple de type denté sélectionnée pour sa richesse en huile.

2000, '**Pactol sumo**' (Syngenta Seeds AG, Suisse) et 2001, '**Andris CL**' (Pau Semences, France) et '**Cabestan**' (Syngenta Seeds AG, Suisse), variétés hybrides simples de type corné × denté se distinguant notamment par une tolérance aux imidazolinones (herbicide). Il s'agit de versions modifiées (plus tolérantes aux imidazolinones) des variétés, 'Pactol', 'Montfort' et 'Prélude', respectivement.

Remarque. La diversité du matériel génétique cultivé, dans une zone donnée, est assez faible. En 1990, en France, 75 % des semences vendues appartenaient seulement à 10 variétés qui, de plus, possédaient des lignées communes ou apparentées. Malgré tout, la diversité à la disposition du sélectionneur est très large, ce qui explique les progrès constants de la sélection. Globalement, il n'apparaît pas de perte de diversité totale au niveau des lignées utilisées dans les programmes de sélection, par rapport à la diversité présente dans les populations avant la création des variétés hybrides.

Regard sur 50 ans de sélection

Les premiers hybrides de maïs ont été réalisés aux États-Unis de façon expérimentale à partir de 1906 et c'est en 1933 que les premiers d'entre eux ont été commercialisés. En France, les premiers travaux lancés par la recherche publique datent des années 1930, mais ils n'ont pas eu de répercussion du fait de la seconde guerre mondiale. À la suite d'une mission aux États-Unis dans le cadre de la mise en œuvre du plan Marshall, des variétés hybrides de maïs ont été essayées avec succès en France à partir de 1948. Mais, elles ne répondaient pas parfaitement aux conditions de culture, en particulier au nord de la Loire, région où la culture était envisagée dès 1947.

Il a fallu attendre la création et la diffusion par l'INRA, à partir de 1957, de variétés hybrides précoces (tolérantes au printemps frais) et résistantes à la verse pour que les surfaces cultivées de cette espèce augmentent très significativement, provoquant ainsi une véritable révolution agricole. Il est important de

noter que cette expansion a d'abord eu lieu dans le Nord, puis dans le Sud, ce qui peut s'expliquer par des différences de structure des exploitations. Dès les années 1960, la France était devenue un pays exportateur.

À l'époque, des « filières de progrès » existaient réellement. Les chercheurs des « Trente Glorieuses » avaient affaire à un monde agricole avide d'innovations techniques et l'existence d'un langage commun à tous permettait le dialogue. Les coopérations entre l'INRA, les services de développement du ministère de l'Agriculture et les professionnels étaient intenses et actives, en particulier pour le maïs. Cela explique la rapidité du mouvement constaté.

Le passage des variétés hybrides doubles aux variétés hybrides simples n'a été possible qu'après amélioration de la valeur propre de chacun des parents, c'est-à-dire notamment une vigueur et une fertilité suffisantes pour permettre une production de semences en quantité notable et de bonne qualité.

Les travaux réalisés par la recherche publique ont été un moteur pour le lancement d'un grand nombre de programmes de sélection dans les entreprises privées. À partir de 1970, la sélection privée a pris le relais de la sélection publique, avec une industrie des semences très bien organisée pour produire des semences de grande qualité. Il existe, actuellement en France, une dizaine d'entreprises de sélection du maïs.

Le progrès génétique réalisé chez le maïs a bénéficié, notamment, du développement de la génétique quantitative et des études sur la méthodologie de la sélection avec les notions d'aptitude à la combinaison, de testeurs et de groupes hétérotiques. Ainsi, la sélection est toujours réciproque, avec un testeur d'un groupe hétérotique et le matériel à sélectionner d'un groupe complémentaire.

Caractères importants améliorés

Rendement. Le gain génétique annuel moyen pour le maïs grain est de l'ordre de 1 q/ha aux États-Unis, de 0,9 q/ha en France, de 0,6 q/ha en Asie et de 0,1 q/ha en Afrique subsaharienne. C'est ainsi qu'en France, le rendement moyen est passé de 16 q/ha en 1948 à 87,8 q/ha en 1999. L'utilisation du maïs en ensilage est plus récente. Sur 15 ans, le gain moyen annuel a pu être estimé à 0,20 t/ha. Ce progrès s'est poursuivi avec des événements tels que l'apparition des premières variétés hybrides 3 voies et plus tard des variétés hybrides simples, qui ont coïncidé avec une accélération du gain moyen annuel (*cf.* encadré p. 420). Cependant, ce progrès n'a pu être obtenu qu'en augmentant les moyens alloués à la sélection au champ, à la recherche et au développement d'outils. Cette augmentation de rendement est essentiellement due à l'adaptation du maïs à des hautes densités de semis avec une sénescence retardée (*staygreen*). Les variétés des années 1980 ont apporté un progrès génétique en valorisant bien la densité. Dans le cas du maïs, on estime que 60 % du progrès en rendement peut être attribué à la génétique, les 40 % restants étant le fait de l'évolution des pratiques agronomiques.

Exploitation de l'hétérosis chez le maïs

L'hétérosis¹ est un phénomène qui a été mis en évidence au début du siècle chez le maïs par le Nord-Américain G.H. Shull, qui l'a défini comme un effet de stimulation dû aux unions gamétiques d'éléments différents. L'hétérosis se traduit par une vigueur plus importante (précocité, rendement élevé, bonne résistance aux bio-agresseurs, bonne faculté d'adaptation à des milieux différents,...), et une bonne homéostasie se traduisant par une moindre sensibilité aux variations du milieu. Elle permet d'associer, dans une variété, plusieurs caractères avantageux complémentaires apportés par chacun des deux parents. Parmi toutes les populations composées de structures hétérozygotes, c'est la structure variétale hybride F_1 (ou hybride simple) qui permet d'exploiter au maximum le phénomène d'hétérosis. De plus, elle permet une très bonne homogénéité (un hybride simple de lignées est formé par un seul génotype), ce qui facilite la mécanisation et la standardisation des pratiques culturales.

Les variétés populations représentent un autre moyen d'exploiter l'hétérosis. En s'appuyant sur des résultats obtenus par le CIMMYT sur des types de matériel génétique très différents, il a été possible d'évaluer, de manière très approximative, le rendement qu'auraient atteint les variétés populations si celles-ci avaient été autant travaillées que les hybrides : il serait de 75 q/ha. Une population peut être très performante, mais elle n'a jamais le même niveau qu'un hybride simple, étant elle-même l'équivalent d'un mélange d'hybrides simples, de niveau de productivité très différent.

L'idée que l'on pourrait avoir des lignées pures de maïs d'un même niveau de rendement que les hybrides n'est pas réaliste. En effet, dans le mécanisme de la dominance, l'hétérosis est théoriquement fixable, mais, en pratique, le nombre de locus en jeu est trop grand pour qu'une telle fixation soit réalisable. Par ailleurs, l'hypothèse de la superdominance pour expliquer l'hétérosis, en complément de celle de la dominance, ne peut être exclue, justifiant là encore la sélection d'hybrides.

Contrairement aux idées reçues, les graines issues de variétés hybrides F_1 ne sont pas des « semences mortes ». Un agriculteur peut ressemer de telles graines, mais il doit s'attendre à des baisses de rendement (en moyenne la moitié de l'hétérosis est perdue en passant de la F_1 à la F_2).

Stabilité / rusticité. Contrairement aux idées reçues, l'amélioration du maïs a davantage porté sur la régularité du rendement et donc sur la rusticité plutôt que sur le rendement en conditions optimales. La régularité du rendement a été améliorée, notamment en augmentant la tolérance aux basses températures de printemps, la résistance à la verse à maturité et la tolérance à la sécheresse. Les variétés hybrides actuelles sont donc bien plus rustiques et bien moins dépendantes des conditions environnementales que les variétés populations anciennes.

Précocité. Elle a permis l'extension de la culture du maïs dans des régions autres que le Sud-Ouest, notamment grâce à l'apparition de variétés hybrides. Les variétés précoces sont résistantes au stade jeune aux conditions thermiques de printemps frais. Leur développement a été un facteur essentiel du développement du maïs ensilage, dans les zones d'élevage de l'ouest et du nord-ouest de la France.

¹ Hétérosis est un nom féminin, bien qu'on le trouve au masculin dans beaucoup d'ouvrages.

Résistance aux bio-agresseurs. Il n'y a pas de problème majeur de maladie chez le maïs, les quelques maladies sont plutôt bien maîtrisées génétiquement. Des variétés avec un bon comportement face à des attaques d'helminthosporiose due à *Helminthosporium turcicum* ou du charbon des inflorescences dû à *Sphacelotheca reiliana* ont été sélectionnées. Par contre, des insectes, en particulier la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) et, dans le sud de la France, la sésamie (*Sesamia nonagrioides*), peuvent causer des dégâts importants. Deux types de résistance à la pyrale ont été trouvées dans l'espèce (au stade jeune et au niveau des gaines des feuilles avant floraison) complétées par la tolérance au sens strict. Ceux-ci ont fait l'objet d'un programme de sélection, avec création de populations synthétiques et de lignées tolérantes aux deux générations de pyrale. Ce matériel a été distribué aux sélectionneurs privés pour contribuer à améliorer la tolérance du matériel cultivé. Par ailleurs, des variétés transgéniques Bt ont été créées (cf. encadrés p. 428 à 430) pour résister à la pyrale. Elles ont été cultivées dans plusieurs pays sur une surface totale de 11,2 millions d'ha en 2004 et s'avèrent présenter un très bon niveau de protection vis-à-vis également de la sésamie. Outre la lutte chimique et l'amélioration génétique, la lutte biologique contre la pyrale est également pratiquée en France notamment à l'aide d'un petit insecte, *Trichogramma brassicae*, parasitoïde des œufs de la pyrale, sur environ 4 % des zones de nuisibilité. Récemment, la présence de la chrysomèle des racines (*Diabrotica virgifera virgifera*), a été détectée sur le territoire français : cet insecte, dont la larve se nourrit des racines, provoque un déficit nutritionnel de la plante et une verse, en cas de forte attaque.

Spécificité pour le maïs fourrage. Des variétés spécifiquement sélectionnées pour la production de fourrage sont disponibles depuis 1987, avec instauration d'épreuves spécifiques en maïs fourrage pour bénéficier de cette appellation. Dans le cas du maïs destiné à l'ensilage, certains critères comme la production de biomasse et la précocité sont importants pour le rendement en matière sèche, facteur essentiel de faisabilité de l'ensilage. Pour assurer une bonne valeur alimentaire, la plante entière à la récolte doit avoir atteint une certaine maturité, sans pour autant que le maximum de transfert n'ait eu lieu vers le grain. L'amélioration de la valeur alimentaire (qui comprend ingestibilité, digestibilité et valeur azotée) est un facteur particulier de la sélection du maïs fourrage. Jusqu'à présent, l'essentiel des travaux a porté sur la digestibilité, l'ingestibilité étant peu travaillée du fait de l'absence de critère prédictif *in vitro*. Le travail sur les matières azotées totales (MAT) est également limité, avec, il est vrai, une variabilité plutôt faible pour ce caractère.

Obstacles ou difficultés

Préservation de l'environnement. L'image de la culture du maïs est parfois ressentie négativement. En fait, les besoins du maïs en fertilisation azotée ne sont pas supérieurs à ceux de n'importe quelle autre céréale. Le problème actuellement rencontré est lié à la concentration des élevages porcins dans

certaines régions et au manque corrélatif de surfaces d'épandage du lisier surabondant. Ces lisiers sont alors épandus sur les surfaces destinées à être semées en maïs, espèce qui tolère les excès d'azote, sachant que, par ailleurs, pour des raisons sanitaires, le lisier ne peut être épandu sur des prairies pâturées.

Utilisation de la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique pour la production de semences. Le cytoplasme « Texas » (ou T) confère aux variétés qui le portent une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique. Ce cytoplasme a été introduit dans de très nombreuses variétés nord-américaines jusqu'au jour où il s'est avéré induire simultanément une très grande sensibilité à la race T d'*Helminthosporium maydis*, champignon responsable d'une helminthosporiose, maladie grave du maïs. Cette sensibilité est spécifique de ce cytoplasme. En 1970, 25 % de la production des États-Unis a été anéantie par cette maladie. Cette expérience malheureuse a été riche en enseignements pour les sélectionneurs du monde entier. Ainsi, pour la production de semences hybrides de maïs à l'aide d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique (sachant que la proportion de semences produites de cette manière est faible en France), ce sont désormais les cytoplasmes C et S qui sont utilisés.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Plusieurs mutations spontanées ont été introduites dans des variétés : – <i>waxy</i> (cireux) : cette mutation se caractérise par une augmentation de la teneur en amylopectines du grain, le rendant assez intéressant en amidonnerie ('DK524wx', 'Panawax') ; – mutation <i>y</i> : maïs blanc, absence de pigments caroténoïdiens ; – <i>opaque2</i> : la composition en acides aminés essentiels des protéines est modifiée, le grain est entièrement farineux. Mais, cette mutation induit plusieurs effets secondaires défavorables qui ont empêché son exploitation pratique ; – <i>bm3</i> (<i>brown midrib</i>, nervure centrale brune) : la valeur alimentaire du maïs fourrage est améliorée par la diminution de la teneur en lignines. Des variétés de type « bm3 », réalisées par Cargill entre autres, commencent à être diffusées aux États-Unis ; – <i>sh2</i> (<i>shrunk</i>en, ridé) : cette mutation, qui a pour effet secondaire de bloquer la conversion des sucres en amidon, a bouleversé l'industrie du maïs doux avec l'apparition des variétés de type superdoux.
Mutagenèse induite	OUI Plus de 60 variétés issues de mutagenèse induite ont été recensées dans le monde, principalement en Chine. La sélection de variants somaclonaux dans des cultures d'embryons <i>in vitro</i> a permis de sélectionner plusieurs mutations intéressantes : la tolérance à la cycloxydime (événement DK404SR) et la tolérance aux imidazolinones (événements IT, 375IR). Il est intéressant de noter qu'une tolérance aux imidazolinones a aussi été obtenue par mutagenèse chimique pratiquée sur des grains de pollen.

suite...

... suite

	ESSAIS La mutagenèse a été également utilisée pour essayer de corriger les défauts du cytoplasme « Texas » et d'éliminer sa sensibilité spécifique à l'helminthosporiose. Ces essais n'ont pas abouti.
Croisements interspécifiques	ESSAIS Des croisements avec le téosinte ont été réalisés et ont donné les lignées F7022 et F7023 se caractérisant par une prolificité en épis. Ces lignées ont été fournies aux sélectionneurs privés.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS Des essais de réalisation de maïs tétraploïdes ont été réalisés dans le but d'augmenter la vigueur des plantes. Mais, ce programme n'a pas été couronné de succès en raison de la mauvaise adaptation des plantes obtenues aux conditions actuelles de culture et surtout des problèmes de fertilité rencontrés.
Transgénèse	Variétés transgéniques. Il existe de nombreuses variétés de maïs transgénique, commercialisées dans des pays tels que les États-Unis, le Canada, l'Argentine,... Les principaux caractères introduits par transgénèse sont des résistances à des herbicides, des résistances aux insectes et des stérilités mâles (<i>cf.</i> encadrés p. 428 à 430). Essais au champ de variétés de maïs transgénique en France. Entre 1986 et 1993, il y a eu plus de 100 essais de maïs transgéniques au champ. Entre 1987 et 1996, la Commission du Génie biomoléculaire a examiné plus de 110 dossiers concernant des variétés de maïs transgénique. En 2003, les laboratoires n'ont soumis qu'une dizaine de dossiers de demande à la CGB en raison des destructions des essais par les mouvements anti-OGM.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	ESSAIS L'introduction de l'apomixie pour la multiplication de variétés de maïs fait l'objet de travaux de recherche.
Sélection sanitaire	OUI Des efforts sont réalisés pour limiter les risques de développement de mycotoxines dues à la fusariose.
Haploïdisation	OUI Des plantes haploïdes ont d'abord été repérées à l'aide d'un gène de coloration de l'albumen (<i>A : anthocyaned</i> , anthocyané). Puis, des plantes haploïdes ont été obtenues par culture d'anthers et de microspores isolées <i>in vitro</i> et, enfin, plus récemment, en utilisant des gènes inducteurs d'haploïdie <i>in situ</i> . Cette dernière méthode connaît un certain développement chez plusieurs sélectionneurs.
Recours à la stérilité mâle	OUI La castration manuelle ou mécanique (élimination de la panicule mâle à l'extrémité apicale du parent femelle) est la méthode la plus pratiquée en France pour le contrôle de l'hybridation dans la production de semences.

suite...

... suite

Des stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques variées (C surtout et S) sont maintenant utilisées ('Castel', 'DK 250', 'Enzo', 'Férial', 'Montblanc') de manière à ce que les problèmes occasionnés par l'utilisation d'une seule stérilité mâle (« Texas » ou T) ne se reproduisent pas.
Des variétés transgéniques mâles stériles [événements 676, 678, 680 ; événement MS3 (INVIGOR™); événement MS6 (INVIGOR™)] sont utilisées aux États-Unis et au Canada.

Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires sont très utilisés chez le maïs. Ils servent, par exemple, dans les études de ressources génétiques, à structurer les populations et des différences importantes ont pu être observées entre le matériel américain et le matériel français. De même, un polymorphisme important a pu être mis en évidence au sein des populations européennes. Il est même possible de prédire les meilleures combinaisons hétérotiques. Les marqueurs moléculaires ont aussi déjà fait leurs preuves pour l'aide à la classification de groupes d'aptitudes à la combinaison. Les marqueurs servent de plus en plus à repérer des gènes et des QTL. Le rétrocroisement assisté par marqueurs est beaucoup utilisé pour accélérer les conversions. Des variétés de maïs issues de sélection assistée par marqueurs sont déjà sur le marché depuis plusieurs années.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Pour les populations, jusque dans les années 1920, la seule méthode de sélection du maïs était la sélection massale. De 1909 à 1930, des recherches sur les hybrides et les méthodes de production de semences hybrides ont été faites aux États-Unis. Depuis 1933, date du début de la culture à grande échelle d'hybrides de maïs aux États-Unis, la sélection du maïs est orienté vers la voie hybride exclusivement. Le maïs est une espèce pilote pour la méthodologie de la sélection de la voie hybride. C'est sur cette espèce qu'ont été explicitées les notions d'aptitudes à la combinaison. De nombreux schémas de sélection ont été expérimentés. Parmi ceux-ci, citons, la sélection récurrente, qui a été largement étudiée chez cette espèce. L'haplométhode est de plus en plus pratiquée.
Types variétaux	Variété population Variétés hybrides. Les variétés hybrides apportent un gain en rendement, en homogénéité et en précocité. Selon le schéma de production de semences, on distingue : – variété hybride double (lignée A1 × lignée A2) × (lignée B1 × lignée B2) ; – variété hybride 3 voies (lignée A1 × lignée A2) × lignée B ; – variété hybride simple (lignée A × lignée B). Aujourd'hui, 95 % des variétés commercialisées sont des hybrides simples ou des quasi-hybrides simples (dans ce dernier cas, les parents de l'hybride simple femelle appartiennent au même groupe hétérotique, voire même sont apparentés).

Perspectives d'amélioration

Au niveau mondial, le maïs est une céréale qui va prendre de plus en plus d'importance dans l'alimentation humaine et animale. Il est important de sélectionner des maïs adaptés au potentiel des milieux (eau et azote) et ayant la qualité optimale pour leur utilisation finale, alimentation animale ou alimentation humaine ou transformation industrielle.

La priorité sera d'abord de créer des variétés par rapport à un potentiel de disponibilité en eau des milieux (réserve du sol + pluviométrie + irrigation tolérable au vu de la ressource et des besoins). La consommation d'eau est linéaire avec la production et il faut éviter de créer des variétés hybrides ayant un potentiel supérieur à la ressource. À ce niveau, il y a aussi des progrès à faire en terme d'amélioration du système racinaire, qui devrait se rapprocher de celui du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) : plus dense, plus ramifié, plus profond. Un autre point est de viser des objectifs de qualité de façon nettement plus prioritaire, pour les utilisations en grain comme en fourrage. Il n'est pas utile de mettre à disposition des éleveurs des variétés de maïs fourrage très productives, mais dont les qualités des parois cellulaires sont telles qu'elles seront à la fois peu ingérées et peu digérées (il y a nombre de variétés hybrides de ce type sur le marché actuellement).

Au-delà de la rusticité des plantes, qui a déjà beaucoup progressé, le recours à du matériel transgénique est une approche qui a montré son efficacité dans le domaine de la tolérance aux insectes, en particulier les foreurs de tiges tels que pyrale et sésamie et la chrysomèle des racines. Elle nécessite d'être diversifiée et gérée pour éviter les contournements par les insectes.

Le temps n'est sans doute pas loin où la société n'acceptera plus les épandages de produits phytosanitaires à l'échelle où ils sont actuellement conduits sur les cultures. À ce titre, il faut aussi bien considérer que le maïs est une plante modèle, en raison de sa biologie florale et de son intérêt économique qui fait que des moyens considérables sont investis sur cette espèce. Le maïs ouvrira la compréhension de nombreux phénomènes majeurs non seulement pour toutes les graminées, y compris celles des prairies et celles à petit grain, mais aussi pour l'ensemble des espèces cultivées sur des thèmes aussi divers que la tolérance aux insectes et aux virus, la croissance racinaire, la mise à fleur et le remplissage du grain, la biogenèse des parois, la photosynthèse ou la biologie cellulaire, etc.

Caractères à améliorer

Rendement en grain et en ensilage. Jusqu'à maintenant, le gain annuel en rendement ne s'est pas ralenti. Les limites physiologiques présumées de 150 q/ha (dans le Nord) ou de 200 q/ha (dans le Sud) en absence de facteurs limitants comme la disponibilité en eau, pourraient être approchées.

Rusticité. L'un des principaux objectifs est d'améliorer la tolérance au déficit relatif en eau que subit cette plante pendant sa période de croissance, afin de

Le maïs et la consommation en eau

L'idée que le maïs est une plante gourmande en eau, est assez répandue. Cependant, si on compare le rapport « consommation d'eau / quantité de biomasse produite entre différentes plantes », on s'aperçoit que le maïs n'est pas plus gourmand que d'autres espèces telles que le sorgho et que c'est l'une des espèces les plus efficaces. En fait, il n'est pas gourmand en eau car il valorise très bien l'eau absorbée. La forte consommation en eau du maïs vient donc uniquement de sa grande productivité qui a augmenté au cours de ces dernières années, ce qui a conduit à des besoins croissants en irrigation. Différentes stratégies sont possibles pour accroître encore la tolérance au manque d'eau. Il est ainsi possible de recourir à une stratégie d'ordre agronomique en décalant le cycle de la plante, c'est-à-dire en privilégiant des variétés précoces afin que la floraison et le remplissage du grain se fassent à une période où l'eau est naturellement plus abondamment accessible. Une deuxième stratégie d'ordre génétique consiste à sélectionner des variétés dont la production en grain ait une meilleure efficacité dans des conditions de moindre consommation d'eau. Une troisième stratégie possible consisterait à modifier le système racinaire de manière à ce qu'il soit plus efficace pour puiser l'eau et les sels minéraux dans un sol plus sec. Dans un futur un peu plus lointain, des progrès pourront venir de l'analyse des mécanismes de résistance à la sécheresse présents chez le téosinte, les *Tripsacum* spp. ou le sorgho. Enfin, il serait sans doute souhaitable de perfectionner un idéotype de maïs comme un maïs à forte valeur alimentaire, dont le rendement serait limité par la disponibilité en eau.

limiter les problèmes environnementaux (cf. encadré ci-dessus) et d'améliorer la stabilité du rendement dans différentes conditions. Le maïs a progressé en rusticité, mais il reste des progrès à faire sur sa capacité à mieux extraire l'eau et l'azote du sol, en particulier avec un système racinaire plus important et plus performant, sans doute de type de celui du sorgho. La création de variétés valorisant mieux l'azote et demandant une utilisation moindre de pesticides et d'herbicides est aussi très intéressante, en particulier dans le cadre du développement de l'agriculture raisonnée et de l'utilisation en agriculture biologique.

Valorisation de l'azote. Il s'agit d'abord de mettre au point des variétés grain qui produiront autant avec une fumure moindre, afin non seulement de limiter les risques de pollution par les nitrates, mais aussi de permettre à l'agriculteur de maintenir une marge bénéficiaire suffisante malgré la baisse des cours. Mais, il peut s'agir aussi d'améliorer la qualité protéique du grain et de l'ensilage afin de diminuer la complémentation azotée dans les rations pour bovins. Dans les deux cas, il faut sélectionner des variétés absorbant bien l'azote et le métabolisant bien : pour les variétés de maïs grain, une remobilisation maximale des protéines de la tige et de la feuille dans le grain est requise, tandis que pour les variétés de maïs fourrage, il faut à la fois maintenir la richesse de la tige en protéines et accumuler les protéines dans le grain. Des variétés existent déjà qui ont à la fois une assez forte teneur en protéines dans le grain et dans les parties végétatives, tout en ayant un bon rendement en grain ou en ensilage.

Valeur alimentaire de la plante entière. Parmi les nouvelles variétés destinées à l'alimentation du bétail, certaines ont une teneur en lignines plus élevée, des qualités de parois végétales différentes et une digestibilité des parois plus faible que celles de certaines anciennes variétés. Ceci est dû au fait qu'une pression de sélection très intense est pratiquée pour la production en grain vis-à-vis d'une part de la résistance à la verse racinaire (« verse végétative ») et d'autre part de la résistance à la casse des tiges à maturité du grain (« verse récolte »). L'enjeu principal reste donc la dissociation entre les qualités mécaniques indispensables des tiges et la digestibilité des parois cellulaires. Pour améliorer la digestibilité, il fut envisagé d'utiliser la mutation *bm3* (*brown midrib*) qui confère une teneur réduite en lignines, mais il a fallu y renoncer en raison des effets très négatifs sur le rendement et la résistance à la verse. D'autres voies sont explorées, en particulier l'amélioration de l'accessibilité aux glucides pariétaux par une modification qualitative des composés des parois (lignines, hémicellulose).

Par ailleurs, pour le maïs dont le grain est destiné à l'alimentation du porc ou des volailles, la teneur en protéines et la composition en acides aminés de ces dernières (le maïs a une faible teneur en lysine et tryptophane qui sont des acides aminés essentiels) pourraient être aussi améliorées afin de diminuer le complément protéique qui doit être fourni aux animaux nourris principalement avec du maïs. Des différences notables de teneur en matière azotée totale existent entre variétés inscrites, mais ce caractère n'est pas pris en considération dans les tests de VAT. La mutation *opaque 2* corrige ce défaut. Bien que cette approche ait longtemps été considérée comme une impasse, des variétés portant cette mutation ont été créées et commencent même à connaître un certain succès, notamment dans des pays tels que le Brésil ou le Mexique.

Adaptation à de nouvelles aires de culture. Dans les collections de ressources génétiques, on peut trouver des maïs très résistants au froid, mais plutôt en condition de fort ensoleillement, alors que la création de variétés pouvant être cultivées dans des pays nordiques requiert des génotypes plutôt résistants à un froid intense et au manque de luminosité. La difficulté est donc grande.

Qualité sanitaire pour l'homme. Les fusarioses sont des maladies causées par des champignons (*Fusarium* spp.) qui peuvent infecter les céréales à paille et le maïs. Ces champignons produisent des mycotoxines notamment au niveau de l'épi au champ. *Fusarium moniliforme* produit de la fumonisine tandis que *F. graminearum* produit du déoxynivalénol et de la zéaralénone. L'enjeu de la qualité sanitaire est tel que les différents acteurs de la filière maïs sont intégrés dans des programmes qui portent, en particulier, sur l'étude du développement des mycotoxines et la sélection de variétés plus tolérantes aux *Fusarium* spp.

L'approche génétique comme le maïs transgénique Bt constitue une solution contre le risque de production de mycotoxines : avec un tel maïs, où les dégâts occasionnés par les chenilles mineuses sont très faibles, la prolifération sur épi des parasites secondaires comme les *Fusarium* spp. est réduite.

Qualité industrielle. L'intérêt de la création de variétés spécifiquement adaptées à chacune des applications industrielles possibles est un sujet souvent discuté, mais le premier critère est le prix. Les opposants à cette idée justifient leur position en signalant que les industriels s'accommodent des variétés déjà existantes et que les différents marchés, au moins en Europe, sont trop petits pour motiver des programmes de sélection coûteux. D'autres pensent, au contraire, que la diversification des produits est l'avenir du maïs. Techniquement, un certain nombre d'améliorations semble accessible. Il pourrait, par exemple, être intéressant de faire des variétés riches en huile en sélectionnant des plantes produisant des graines à gros embryons, ce qui permettrait sans doute de faire passer la teneur en huile de 4 à 8 %, en particulier dans le cadre de l'alimentation animale dans des filières courtes.

Techniques à développer

Les nouveaux types de marqueurs moléculaires tels que les SNP vont, sans doute, avoir un grand rôle à jouer dans les années futures, en particulier pour évaluer l'intérêt du fond génétique de matériel tropical qui n'a pas encore été vraiment bien exploité. En effet, ces nouveaux marqueurs moléculaires sont bien adaptés à l'exploration de la très grande variabilité naturelle du maïs.

La mise au point d'une méthode d'induction de plantes haploïdes applicable à grande échelle (avec l'aide d'un gène inducteur), pratiquée en serre et en plein champ et non plus en laboratoire, permet de considérer l'haplométhode pour créer des lignées et accélérer ainsi le processus de création variétale.

La transgénèse est un outil qui est amplement utilisé dans le monde pour l'amélioration du maïs (*cf.* tabl. p. 423) et qui est appelé à se développer, en particulier pour l'introduction de gènes de résistance aux insectes.

L'apomixie (multiplication végétative par la graine). Introduire l'apomixie chez le maïs aurait pour principal avantage de permettre un développement, une multiplication et un maintien plus facile des génotypes hybrides élités. Ainsi, un génotype de maïs apomictique pourrait devenir une variété, comme c'est le cas chez des espèces à multiplication végétative et l'apomixie permettrait de produire des semences sans les problèmes de distances d'isolement et à moindre coût. Quelques programmes de recherche publique dans le monde ont pour objectif d'introduire le caractère d'apomixie dans le maïs (soit par croisements interspécifiques avec *Tripsacum dactyloides* (L.) L., soit par clonage et transfert des gènes impliqués dans l'apomixie chez cette espèce).

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation dans au moins un pays

Résistance Bt aux insectes, notamment à la pyrale (*Ostrinia nubilalis*). Aux États-Unis et au Canada, les dégâts annuels causés par cet insecte sont chiffrés à plus d'un milliard de dollars. En France, la pyrale pose des problèmes pour les cultures de maïs tardif. Le gène *cry1Ab*,

provenant de *Bacillus thuringiensis*, code une delta-endotoxine, qui agit comme un insecticide, spécifiquement sur les lépidoptères. Cette protéine peut se fixer sur des récepteurs spécifiques présents sur l'épithélium de l'intestin de ces insectes. Les protéines fixées forment ensuite des canaux cationiques qui perturbent complètement le fonctionnement de l'intestin. Ces dysfonctionnements conduisent à la paralysie, puis à la mort de l'insecte. Ces endotoxines sont inoffensives pour les mammifères, car ceux-ci ne possèdent pas de récepteur. L'innocuité de cette protéine a été vérifiée en nourrissant des mammifères et des oiseaux en laboratoire, avec de la nourriture contenant un supplément en protéines de *Bacillus thuringiensis*. Par ailleurs, ces protéines disparaissent rapidement au cours de la fermentation et ne sont plus présentes dans l'ensilage consommé. D'autres gènes *cry* peuvent être utilisés pour lutter contre la pyrale (*cry9c*, *cry1Ac*,...) ou contre d'autres insectes (*cry3Bb1*,...).

Résistance aux herbicides à phosphinothricine. La phosphinothricine est le composé actif des herbicides à glufosinate d'ammonium. Cette substance provoque une diminution de la production de glutamine et une accumulation d'ammoniaque dans les tissus, qui conduit à la mort des plantes traitées. L'expression du gène *bar*, provenant des bactéries du sol *Streptomyces hygroscopicus* (et *S. viridochromogenes*), permet de conférer une résistance aux herbicides Basta®, Rely®, Final® et Liberty®. En effet, la protéine codée par ce gène, la phosphinothricine-N-acétyltransférase (PAT), détoxifie la phosphinothricine (composé actif des herbicides) en catalysant son acétylation. Le fait que les bactéries *S. hygroscopicus* et *S. viridochromogenes* soient présentes partout dans le sol et qu'aucun effet délétère n'ait été déclaré sur l'homme, les animaux ou les plantes, tend à montrer l'innocuité de la PAT.

Résistance au glyphosate. Deux gènes doivent être introduits pour obtenir une résistance satisfaisante au glyphosate :

- la 5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthétase (EPSPS) est une enzyme, présente exclusivement chez les plantes et les bactéries, qui est responsable de la biosynthèse d'acides aminés aromatiques tels que la tyrosine, la phénylalanine et le tryptophane. Le glyphosate, l'agent actif de l'herbicide Roundup®, agit en se fixant et en inactivant l'EPSPS. Un gène, découvert chez la souche CP4 d'*Agrobacterium tumefaciens*, code une EPSPS insensible au glyphosate (CP4 EPSPS). L'affinité du glyphosate pour la CP4 EPSPS est très faible, ce qui permet aux plantes produisant cette enzyme de résister à l'herbicide. Des animaux nourris avec une ration alimentaire contenant un supplément en cette protéine n'ont pas eu de problème particulier ;

- un gène *gox* codant une glyphosate oxydase et provenant de la bactérie *Ochrobactrum anthropi* peut aussi être introduit dans les plantes. Cette enzyme accélère la dégradation du glyphosate en acide aminométhylphosphonique (composé facilement dégradé par de nombreux micro-organismes) et en glyoxylate (composé naturellement présent dans les cellules végétales). Des tests en laboratoire ont montré que l'ingestion de cette protéine n'occasionnait pas de trouble aux animaux.

Stérilité mâle. Ce caractère peut être induit dans les plantes en introduisant un gène, provenant d'*Escherichia coli*, codant une ADN-adénine méthylase (AAM). La stérilité mâle résulte de l'incapacité des transformants à former des anthères et du pollen. Une autre solution pour obtenir une stérilité mâle est de faire exprimer la barnase, une ribonucléase provenant de *Bacillus amyloliquefaciens*, dans les cellules du tapis du sac pollinique durant le développement de l'anthère. La ribonucléase, en s'attaquant aux ARN, perturbe le fonctionnement des cellules et provoque un arrêt précoce du développement des anthères.

À propos des maïs transgéniques et du papillon monarque

« Les maïs transgéniques Bt sont-ils dangereux pour le papillon monarque? » En 1999, un article publié dans *Nature* a montré, qu'en conditions de laboratoire, 44 % des larves de papillon monarque, *Danaus plexippus*, mouraient après avoir consommé des feuilles d'asclépiade de Curaçao (*Asclepias curassavica* L.) saupoudrées avec du pollen de maïs transgénique Bt (gène provenant de *Bacillus thuringiensis*). Aux États-Unis et au sud du Canada, l'asclépiade commune, *Asclepias syriaca* L. qui croît à côté des champs de maïs, est l'hôte principal du monarque et sert de nourriture exclusive à ses larves. Cet article, bien qu'il n'apporte aucune preuve de la toxicité des maïs Bt en conditions naturelles, a jeté le discrédit sur l'ensemble des plantes transgéniques et a probablement joué un rôle prépondérant dans l'instauration du moratoire sur les variétés OGM déjà autorisées en Europe. L'Agence de l'environnement des États-Unis a lancé une enquête auprès de plus de 30 chercheurs afin de préciser les risques que pouvait présenter l'utilisation des maïs Bt. Les résultats de cette enquête ont été publiés dans six articles parus dans *Proceedings of the National Academy of Science*. Ces articles montrent que le risque pour qu'une larve de monarque soit soumise à des doses toxiques de pollen Bt dans un champ de maïs et sa proche périphérie est inférieur à 0,4 % (pour les variétés porteuses des événements Mon 810 et Bt 11). Par ailleurs, la population de papillons monarques dans le *Corn Belt* a augmenté de 36 % entre 1998 et 1999, période où les maïs transgéniques y étaient extensivement cultivés. Les conclusions de l'article de *Nature* de 1999 sont donc contredites sur le terrain.

Inscription et protection des variétés en France

1937, ouverture du catalogue maïs.

1963, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste B de variétés maïs hybrides.

1986, première année où des tests ensilage ont été réalisés pour l'inscription au catalogue officiel français.

1994, création, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés à usages industriels réservés (VUIR).

1996, autorisation, par arrêté ministériel, de la mise sur le marché de lignées de maïs transgéniques résistantes à la pyrale.

1999, prise en compte de la valeur énergétique UFL pour l'inscription au catalogue officiel.

En 2003, 1 381 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français, dont 1 001 réparties en 3 groupes de maturité de maïs fourrage, 7 groupes de maturité de maïs grain et plusieurs autres groupes de maïs spéciaux (cireux, blanc,...), disponibles à la vente sur la liste A. En 2003 également, plus de 3 000 étaient inscrites au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Dans les épreuves de DHS du GEVES, une trentaine de caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. Les observations sont effectuées en première année et deuxième année. Il faut cependant signaler que pour les variétés dont les résultats sont particulièrement bons, la décision

favorable peut être prise à l'issue de la première année. À l'issue de ces 2 ans d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Dans le cas du maïs, les lignées parentales sont soumises également aux épreuves DHS.

Pour être inscrite en liste A, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par les 3 variétés choisies parmi les plus performantes et les plus vendues. Ces témoins sont actualisés chaque année. La décision d'inscription des variétés en étude est prise après comparaison aux deux meilleurs parmi les 3 témoins. Une décision favorable peut être prise dès la première année d'étude pour les variétés qui démontrent une supériorité significative par rapport aux 2 meilleurs témoins pour l'ensemble des caractères décisionnels. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

La prise en compte de certains critères par la sélection a conduit à faire évoluer les épreuves de VAT et réciproquement.

Depuis 1986, des épreuves spécifiques « fourrage » sont proposées et on distingue des variétés ayant satisfait aux épreuves grain et fourrage, d'autres ayant satisfait uniquement aux épreuves fourrage.

Plusieurs variétés de maïs ont été enregistrées sur la liste VUIR. Elles ne sont pas disponibles sur le marché des semences et sont destinées à un usage particulier dans le cadre de contrats d'intégration.

Pour en savoir plus

Alabouvette L., Cauderon A., Meneret G., Michel D., Rautou M. et Chad C., 1949. Les maïs hybrides américains en France, premières observations 1947-1948. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 35 (6), 1-5.

Anglade P., Barrière Y., Beckert M., Boyat A., Derieux M., Gallais A., Giauffret C., Hébert Y. et Pollacsek M., 1992. Le maïs. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 89-111.

- Anonyme**, 2002. *L'analyse des bénéfices des OGM*. Rapport de la Commission du génie biomoléculaire et du Comité provisoire de biovigilance, 24 p.
- Barrière Y., Gallais A., Derieux M. et Panouillé A.**, 1987. Étude de la valeur agronomique en plante entière au stade récolte ensilage de différentes variétés de maïs grain sélectionnées entre 1950 et 1980. *Agronomie*, 8 (6), 513-519.
- Barrière Y., Argillier O., Émile J.-C., Giauffriet C., Hébert Y. et Michalet-Doreau B.**, 1996. Idéotype maïs ensilage, et variabilité génétique de la valeur alimentaire. *Colloque maïs ensilage*, AGPM, Nantes, 293-308.
- Barrière Y.**, 2000. Le maïs fourrage. I. Origine, évolution, ressources génétiques et méthodes de sélection. *Fourrages*, 162, 107-119.
- Barrière Y. et Émile J.-C.**, 2000. Le maïs fourrage. II. Évaluation et perspectives de progrès génétique sur les caractères de valeur agronomique. *Fourrages*, 163, 209-220.
- Barrière Y. et Émile J.-C.**, 2000. Le maïs fourrage. III. Évolution et perspectives de progrès génétique sur les caractères de valeur alimentaire. *Fourrages*, 163, 221-238.
- Beadle G.W.**, 1939. Teosinte and the origin of maize. *J. Hered.*, 30, 245-247.
- Beadle G.W.**, 1980. The ancestry of corn. *Sci. Am.*, 242, 112-119.
- Benz B.**, 2001. La domestication du maïs. *La Recherche*, 348, 24-29.
- Berger J.**, 1962. Maize production and the manuring of maize. Conzett et Huber, Zürich, Centre d'étude de l'azote, Genève, 5, 315 p.
- Betz F.S., Hammond B.G. et Fuchs R.L.**, 2000. Safety and advantages of *Bacillus thuringiensis* protected plants to control insect pests. *Regul. Toxicol.*, 32, 156-173.
- Bordes J., Dumas de Vaulx R., Lapierre A. et Pollacsek M.**, 1997. Haplodiploidization of maize (*Zea mays* L.) through induced gynogenesis assisted by glossy markers and its use in breeding. *Agronomie*, 17, 291-297.
- Boyardieu J.**, 1980. Le maïs. Dans : *Les cultures céréalières*. Nouvelle Encyclopédie des connaissances agricoles, Hachette, Paris, 217-237.
- Brake J. et Vlachos D.**, 1998. Evaluation of transgenic event 176 « Bt » corn in broiler chickens. *Poult. Sci.*, 77, 648-653.
- Cauderon A.**, 1958. Les maïs hybrides en France. Étude de la précocité. *Ann. Amélior. Plant.*, 8, 272-289.
- Cauderon A.**, 1959. *Hétérosis et sélection réciproque chez le maïs*. C. R. 2^e Congrès de l'Association européenne pour l'amélioration des plantes Eucarpia, 10-19.
- Cauderon A.**, 1980. Génétique, sélection et expansion du maïs en France depuis trente ans. *Cultivar*, 133, 13-19.
- Cauderon A.**, 1982. Origine des lignées INRA F2 et F7. *Agromais*, 13, 28.
- Cauderon A.**, 2004. L'INRA dans l'amélioration des plantes des « Trente Glorieuses » à la lumière des préoccupations actuelles. Dans : *L'amélioration des plantes, continuités et ruptures*, Colloque INRA Montpellier, octobre 2002, P. Boistard, C. Sabbagh et I. Savini, éd., 59-66.
- Chase S.S.**, 1969. Monoploids and monoploid-derivatives of maize (*Zea mays* L.). *Bot. Rev.*, 35 (2), 117-167.
- Comstock R.E., Robinson H.F. et Harvey P.H.**, 1949. A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Agron. J.*, 41, 360-367.
- Derieux M., Darrigrand M., Gallais A., Barrière Y., Bloc D. et Montalant Y.**, 1987. Estimation du progrès génétique réalisé chez le maïs grain en France entre 1950 et 1985. *Agronomie*, 7 (1), 1-11.
- Gallais A.**, 1989. *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*. Masson Éd., Paris, 606 p.
- Gallais A.**, 2002. Progrès génétique chez le maïs. *Sél. Fr.*, 53, 23-33.

- Gauthier P., Gouesnard B., Dallard J., Redaelli R., Rebourg C., Charcosset A. et Boyat A.**, 2002. RFLP diversity and relationships among European maize populations. *Theor. Appl. Genet.*, 105, 91-99.
- Gay J.-P.**, 1984. *Fabuleux maïs : histoire et avenir d'une plante*. Éditions AGPM, Pau, 295 p.
- Gouache J.-C.**, 2002. Variétés à usages industriels réservés et production en filières : facteurs clés en matière de protection de la propriété intellectuelle. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 88 (2), 13-22.
- Gouesnard B., Dallard J., Panouillé A. et Boyat A.**, 1997. Classification of French maize populations based on morphological traits. *Agronomie*, 17, 491-498.
- Guiard J.**, 2002. Homologation et protection juridique des variétés dédiées. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 88 (2), 23-31.
- Hellmich R.L., Siegfried B.D., Sears M.K., Stanley-Horn D.E., Daniels M.J., Mattila H.R., Spencer T., Bidne K.G. et Lewis L.C.**, 2001. Monarch larvae sensitivity to *Bacillus thuringiensis*-purified proteins and pollen. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001 Oct. 9, 98 (21), 11925-11930.
- Jones D.F.**, 1922. The productiveness of single and double first generation corn hybrids. *Agron. J.*, 14, 241-252.
- Lashermes P. et Beckert M.**, 1988. A genetic control of maternal haploidy in maize (*Zea mays* L.) and selection of haploid inducing lines. *Theor. Appl. Genet.*, 76, 405-410.
- Lorgeou J.**, 1996. Maïs : quarante ans de progrès génétique. *Perspect. Agric.*, 216, 89-95.
- Lorgeou J.**, 2004. Le marquage moléculaire pour valoriser la diversité génétique. *Perspect. Agric.*, 307, 84-89.
- Lorgeou J. et Barrière Y.**, 1996. Le progrès génétique en maïs fourrage. *Colloque Maïs Fourrages*, Nantes, 319-334.
- Lossy J.E., Rayor L.S. et Carter M.E.**, 1999. Transgenic pollen harms monarch larvae. *Nature*, 399, 214.
- Luciani A.**, 2004. Le maïs fourrage. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 131-153.
- Mc Clintock B.**, 1948. Mutable loci in maize. *Carnegie Inst. Wash. Year Book*, 47, 155-159.
- Mc Clintock B.**, 1953. Induction of instability at selected loci in maize. *Genetics*, 38, 579-599.
- Moule C.**, 1980. Maïs. Dans : *Céréales*. La Maison rustique, Paris, 223-280.
- Niebur W.S.**, 1993. Le maïs. Dans : *Méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE éditions, Paris, 123-132.
- Oberhauser K.S., Prysby M.D., Mattila H.R., Stanley-Horn D.E., Sears M.K., Dively G., Olson E., Pleasants J.M., Lam W.K., Hellmich R.L.**, 2001. Temporal and spatial overlap between monarch larvae and corn pollen. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001 Oct. 9, 98 (21), 11913-11918.
- Ouvrage collectif**, 1959. La culture du maïs hybride en France. *Actual. agron.*, série B, n° 1 INRA, Paris, 141 p.
- Pleasants J.M., Hellmich R.L., Dively G.P., Sears M.K., Stanley-Horn D.E., Mattila H.R., Foster J.E., Clark P. et Jones G.D.**, 2001. Corn pollen deposition on milkweeds in and near cornfields. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001 Oct 9, 98 (21), 11919-11924.
- Promaïs**, 1999. *L'aventure des maïs hybrides en France*. Promaïs, Toulouse, 13 p.
- Quist D. et Chapela I.H.**, 2001. Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature*, 414, 541-543.
- Rautou S.**, 1954. Populations de pays et hybrides de maïs. *Agriculture*, 153, 7-11.
- Rebourg C., Chastenet M., Gouesnard B., Welcker C., Dubreuil P. et Charcosset A.**, 2003. Maize introduction in Europe : the history reviewed in the light of molecular data. *Theor. Appl. Genet.*, 106, 895-903.
- Savidan Y.**, 2000. Apomixis. *Genet. Breed.*, 18, 13-86.

- Schnell F.W.**, 1974. Trends and problems in breeding methods for hybrid corn. *Proc. 16th British Poultry Breeders Round Table*, Birmingham, 86-98.
- Sciama Y.**, 2001. Le maïs transgénique obtient la relaxe. *La Recherche*, 248, 18-19.
- Sears M.K., Hellmich R.L., Stanley-Horn D.E., Oberhauser K.S., Pleasants J.M., Mattila H.R., Siegfried B.D. et Dively G.P.**, 2001. Impact of Bt corn pollen on monarch butterfly populations : a risk assessment. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001 Oct. 9, 9 (21), 11937-11942.
- Semences et Progrès**, 2001. Maïs « Spécial distribution », 109, 23-106.
- Semences et Progrès**, 2005. Numéro spécial maïs, novembre, 120 p.
- Shull G.H.**, 1908. The composition of a field of maize. *Am. Breeders' Assoc. Rep.*, 4, 296-301.
- Sprague G.F. et Tatum L.A.**, 1942. General versus specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agric.*, 34, 923-932.
- Stanley-Horn D.E., Dively G.P., Hellmich R.L., Mattila H.R., Sears M.K., Rose R., Jesse L.C., Losey J.E., Obrycki J.J. et Lewis L.**, 2001. Assessing the impact of Cry1Ab-expressing corn pollen on monarch butterfly larvae in field studies. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001 Oct. 9, 98 (21), 11931-11936.
- Tracy W.F.**, 1997. History, Genetics and Breeding of Supersweet (*shrunken2*) Sweet Corn. *Plant Breed. Rev.*, 14, 189-236.
- Troyer A.F.**, 1998. Early Illini corn breeders : their quest for quality and quantity. *Proc. 50th Annual Corn and Sorghum Research Conference*, 56-57.
- Wilkes H.G.**, 1977. Hybridization of Maize and Teosinte in Mexico and Guatemala and the improvement of Maize. *Econ. Bot.*, 31, 254-293.
- Zangerl A.R., McKenna D., Wraight C.L., Carroll M., Ficarello P., Warner R. et Berenbaum M.R.**, 2001. Effects of exposure to event 176 *Bacillus thuringiensis* corn pollen on monarch and black swallowtail caterpillars under field conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2001, Oct. 9, 98 (21), 11908-11912.

Le melon

Cucumis melo L. ($2n = 2x = 24$)
(Cucurbitacées)

Présentation de l'espèce

Le melon cultivé (*Cucumis melo* L.) est originaire de l'Afrique intertropicale sous la forme sauvage *C. melo* L. subsp. *agrestis* (Naudin) Pangalo. L'Asie, de la Méditerranée à l'Extrême-Orient, constitue la zone de diversification de l'espèce. Les graines de melon ont une certaine valeur nutritionnelle qui est probablement à l'origine de l'intérêt porté à cette espèce. À partir du type sauvage au fruit de 30-50 g, la domestication a abouti à des fruits de formes et de tailles très variées. Le melon était déjà cultivé en Égypte, vers 1500-2000 av. J.-C., puis en Grèce et en Italie au 1^{er} siècle apr. J.-C. Les premiers types cultivés étaient assez peu sucrés et consommés en salade. Le type Cantaloup a probablement été introduit pendant la Renaissance en Italie à partir de l'Asie mineure et a été largement cultivé en France à partir du XVI^e siècle. Le « Cantaloup charentais », qui est le principal cultigroupe présent en France, s'est imposé dans la seconde moitié du XX^e siècle alors qu'il était très minoritaire au cours du XIX^e siècle. Ce cultigroupe est typiquement français et nos voisins italiens ou espagnols consomment des types différents (à l'exception de la population locale italienne 'De Viadana' qui se rattache au charentais français).

Le melon est phylogénétiquement assez éloigné des autres espèces appartenant au genre *Cucumis* L. Aucun croisement interspécifique n'a été exploité à ce jour. Le melon n'existe à l'état sauvage qu'en Afrique semi-désertique (Soudan) et en Inde. Des formes subsponsanées existent également en Amérique centrale.

Le melon est une espèce allogame, annuelle, multipliée par semences qui peut aussi être greffée. Sa biologie florale est variée (cf. encadré p. 443).

Le melon est cultivé dans environ 80 pays. Il existe une grande diversité morphologique et comportementale, vis-à-vis des maladies notamment, qui est cependant due à un polymorphisme d'un nombre relativement réduit de gènes. La variabilité en Afrique n'est pas en voie de disparition. Par contre, les variétés

locales, dans les pays du Bassin méditerranéen, sont en train de disparaître, en particulier au profit des variétés d'obteneurs qui sont souvent des hybrides F_1 . La variabilité génétique du melon est conservée au sein de plusieurs collections. L'INRA, à Avignon (Vaucluse), a constitué une collection depuis les années 1950. Depuis 1996, les ressources génétiques du melon sont gérées en France par un réseau sous l'égide du BRG comprenant l'INRA et une dizaine de sélectionneurs privés. Des collections importantes de melon existent dans le monde notamment à l'USDA (*National Plant Germplasm System*, Ames, Iowa) aux États-Unis.

Production et utilisation

Le produit récolté, le melon, est un fruit charnu, une baie dont le poids varie de 30-50 g chez les formes sauvages à plus de 10 kg pour certaines formes cultivées.

La production mondiale de melon a été de 28,3 millions de tonnes. En 2005, les principaux producteurs sont la Chine (15,1 millions de tonnes), la Turquie (1,2 million de tonnes), l'Iran (1,2 million de tonnes), l'Espagne (1,18 million de tonnes) et les États-Unis (1,15 million de tonnes). La France a eu une production de 295 000 tonnes (données FAO, 2005).

Selon les pays et leurs traditions, suivant l'utilisation du fruit, le melon récolté est considéré comme :

- un légume : non sucré, il est récolté immature ou à maturité, et consommé à l'état frais, cuit ou même conservé dans la saumure, les formes cylindriques sont souvent qualifiées de concombre ;
- un fruit : sucré, il est récolté à maturité et consommé à l'état frais ;
- un parfum : il est disposé dans la maison (ou dans la poche !) lorsqu'il est mûr et l'odeur dégagée parfume celle-ci.

On peut ainsi distinguer trois grands groupes de melon cultivé. Par ailleurs, du point de vue de la maturation du fruit, il existe :

- des variétés à fruit à phase climatérique¹, généralement aromatique et de faible à moyenne durée de conservation après récolte ;
- et des variétés à fruit sans phase climatérique, peu aromatique et de moyenne à longue durée de conservation après récolte (pouvant aller jusqu'à plusieurs mois).

La phase climatérique est une crise respiratoire au cours de laquelle la respiration du fruit (melon) est modifiée à la suite d'une forte synthèse autocatalytique d'éthylène. Elle se situe pendant la dernière phase de croissance du fruit, soit vers le 40^e jour. Elle est liée à un changement de couleur de l'écorce du fruit, à la déhiscence du pédoncule, à l'accumulation de glucides (saccharose), au ramollissement

¹ climatérique est le mot français mais on trouve climactérique dans beaucoup d'ouvrages (en anglais, *climacteric*).

Les principaux types variétaux

Le type Cantaloup charentais. Le fruit est rond, l'écorce lisse ou « écrite » (« écrite », c'est-à-dire présentant une formation liégeuse de faible intensité) vert clair, jaunissant légèrement à maturité, avec des lignes de suture (sillons) plus foncées. Il pèse environ 1 kg. La chair est orangée, sucrée, juteuse et très parfumée. La maturation est climatérique. Les variétés anciennes sont à faible durée de conservation alors que certaines variétés récentes ont une plus longue durée de conservation.

Le type brodé américain. Le fruit rond ou allongé a des broderies épaisses, larges et denses. La chair est orangée, ferme, sucrée, à saveur prononcée. La maturation est climatérique. Il pèse 1 à 3 kg et se conserve plus longtemps que le type charentais classique. Il est cultivé aux États-Unis et en Australie.

Le type brodé italien. Le fruit est allongé et brodé. La chair est rouge orangé et sucrée. La maturation est climatérique. Ce type de melon est souvent jugé quelconque par les consommateurs français. Originaire des États-Unis (Floride, New Jersey), il a été introduit en Italie au cours du xx^e siècle.

Le type brodé français. C'est un type intermédiaire entre le charentais et le brodé américain. Le fruit est rond, l'écorce est brodée, mais les sillons sont lisses. La chair est orangée et sucrée. La maturation est climatérique. Ce type a été créé par la sélection depuis 1980, pour combiner les qualités des types charentais et brodé américain.

Le type jaune canari. Le fruit est ovale à écorce jaune vif. Il pèse 2 à 3 kg. La chair est blanc verdâtre, très sucrée, peu aromatique. La maturation est non climatérique. Ce type est très cultivé en Espagne, aux États-Unis et en Amérique du Sud.

Le type Piel de sapo (« Peau de crapaud » en espagnol). Le fruit est ovale, l'écorce verte mouchetée de jaune avec des taches vert foncé. La chair est blanc verdâtre, sucrée, juteuse, peu aromatique. La maturation est non climatérique. C'est le type le plus cultivé en Espagne et en Turquie (sous le nom de *Kirkagac*).

Le type vert olive. Le fruit est ovale, l'écorce est vert sombre, lisse ou plissée. La chair est verte ou blanche. La maturation est non climatérique et le fruit se conserve très longtemps. Ce type est cultivé en Espagne sous le nom de *Tendral* et en Turquie sous le nom de *Yuva*.

Le type honeydew. Le fruit est rond, l'écorce est lisse, blanc gris. Il pèse 2 kg. La chair est verdâtre (parfois orangée dans certaines variétés récentes). Ce type à maturation non climatérique produit un fruit de bonne conservation. Il est cultivé aux États-Unis, en Amérique, en Australie et en Asie. Il dérive de l'ancienne variété française 'Blanc d'Antibes d'hiver'.

Le type ananas. Le fruit est ovale, l'écorce est jaune orangé, à fines broderies peu denses. La chair est blanche à saumonée, sucrée, juteuse, plus ou moins aromatique. La maturation est climatérique. Ce type est cultivé en Afrique du Nord et au Moyen-Orient.

Le type Galia. C'est un type nouveau, d'origine israélienne qui a été obtenu entre autres, à partir d'un géniteur d'Europe centrale dénommé 'Ogen'. Le fruit est rond, l'écorce est légèrement brodée et orangée à maturité. La chair est verdâtre, parfumée. La maturation est climatérique. Ce type est très cultivé en Israël et en Espagne pour l'exportation vers l'Europe du Nord.

Enfin, de nombreux autres types sont peu connus en France mais peuvent avoir une grande importance économique dans d'autres pays : par exemple, les types *fakouss* ou *adjour* dont on consomme le fruit immature en salade ou en saumure comme le concombre, du Maghreb à l'Inde, les types à fruit allongé cultivés en Iran et les types à fruit rond brodé à chair verte cultivés au Japon.

de la chair et au développement d'arômes. L'importance de cette phase conditionne l'aptitude à la conservation : le fruit d'une variété sans crise climatérique se conserve mieux qu'un fruit d'une variété à forte crise climatérique.

En France, le melon est essentiellement consommé en tant que fruit et apprécié pour sa saveur sucrée ; et le cultigroupe Cantaloup charentais représente 80 % de la production. Les autres variétés cultivées en France appartiennent aux types brodé français, jaune canari, vert olive et *Galia* tandis que de nombreux types variétaux sont cultivés à travers le monde (cf. encadré p. 437).

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Elles sont andromonoïques.

Vers 1800, '**Cantaloup Prescott à fond blanc**' (Prescott, jardinier anglais qui l'apporta à Paris), variété population de type Cantaloup, à larges côtes, à écorce panachée de vert foncé et de vert pâle sur fond blanc. Cette variété à gros fruit de 3 à 4 kg, était une des plus cultivées sous châssis, dans la Région parisienne.

'**Petit gris de Rennes**', variété population proche du type Cantaloup charentais, à écorce verte non côtelée, dont le fruit de très bonne qualité gustative, présente par ailleurs une grande fragilité. Elle est encore cultivée pour des marchés locaux et par des jardiniers amateurs.

'**Ananas d'Amérique**' (à chair rouge ou à chair verte), variété population de melon précoce, dont le fruit à chair fondante et sucrée est très parfumé.

'**Sucrin de Tours**', variété population de type brodé, productive et de culture facile en pleine terre.

'**Blanc d'Antibes d'hiver**', variété population à l'origine du type *honeydew* nord-américain, autrefois cultivée en France. Cette variété est un exemple de melon d'hiver, très répandu dans la Région méditerranéenne dans les années 1920. Pouvant se garder plusieurs mois, il était très apprécié pour constituer des réserves non seulement dans le Midi, mais aussi à Paris où il était vendu en hiver.

'**Charentais**', variété population largement cultivée en France au XX^e siècle. Les agriculteurs, puis les semenciers ont sélectionné des variétés (pour la forme, le calibre du fruit,...) telles que '**Charentais mistral**' (Ribot et Faure, France), '**Charentais gros Pécout**' (Ribot et Faure, France), '**Védrantais**' ou '**Charentais Superprécoce du roc**' (Vilmorin-Andrieux, France) qui furent inscrites au catalogue officiel en 1973, année de l'ouverture de la liste des variétés de melon. La variété '**Védrantais**' était très cultivée dans les années 1970. Le fruit du 'Charentais' classique ne se conserve qu'un à deux jours après récolte au début de l'abscission du pédoncule sur le fruit, c'est-à-dire au stade optimal de goût.

1937, **'PMR 45'**, variété population sélectionnée en Californie, de type brodé américain, qui est la première variété de melon résistante à une maladie : l'oïdium (*Sphaerotheca fuliginea*, race 1).

Variétés récentes

1973, **'Cantor'** (Vilmorin-Andrieux, France), première variété hybride F₁ andromonoïque de type charentais, résistante au *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, races 0 et 1 et ayant un bon niveau de tolérance à l'oïdium. Elle a eu un faible développement en raison du calibre insuffisant de son fruit.

1973, **'Doublon'** (INRA, France), première variété lignée pure andromonoïque de type charentais, résistante au *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, races 0 et 2. Cette variété est le résultat d'un travail conduit à l'INRA à partir de 1957.

1973, **'Pharo'** (Les Graines Caillard, France), première variété hybride F₁ andromonoïque de type charentais qui a connu un large succès commercial.

1978, **'Printadou'** (INRA, France), première variété lignée pure andromonoïque de type charentais, résistante aux races 0, 1 et 2 de *F. oxysporum* f. sp. *melonis*.

1981, **'Alpha'** (Institut de recherche Tézier, France), première variété hybride F₁ monoïque de type charentais. Elle représente un changement radical de la taille de la plante, de la biologie florale et de l'aspect lisse de l'écorce du fruit. À partir de cette date, la monoécie devient prépondérante en France.

Une vingtaine de variétés de ce type ont été inscrites jusqu'en 1990 dont les plus cultivées furent 'Alpha', 'Gama' et 'Delta' (respectivement 1981, 1982 et 1983, Institut de recherche Tézier), 'Jet' (1986, Clause) et 'Presto' (1986, Caillard). Leur faible conservation et leur sensibilité à la vitescence dut être améliorée et il en résulta une nouvelle gamme variétale avec 'Bastion' et 'Figaro' (respectivement 1991 et 1995, Graines Gautier) notamment, avant l'adoption de variétés à plus longue conservation comme 'Lunastar' (Bio-Obtentions) et 'Cézanne' (Clause Semences).

1981, **'Hermès'** (Gautier, France), variété hybride F₁ andromonoïque de type charentais. Elle a représenté 80 % des surfaces au début des années 1980. Son succès, à cette époque, est dû au cumul des résistances aux races 0, 1 et 2 de *F. oxysporum* f. sp. *melonis*, à une bonne nouaison dans des conditions variées et à un rendement important. 'Alpha', variété monoïque, lui succéda vers 1985 comme variété leader, dès que les agriculteurs eurent intégré les facilités de conduite culturale de ce matériel dans leur itinéraire technique.

1981, **'Piboule'** (INRA, France), première variété lignée pure andromonoïque de type charentais, résistante aux races 0, 1 et 2 et tolérante à la race 1-2 de *F. oxysporum* f. sp. *melonis*.

1986, **'Soldor'** (Clause, France), variété hybride F₁ andromonoïque de type charentais, se caractérisant par une tolérance au *Fusarium* race 1-2 et à l'oïdium (*Sphaerotheca fuliginea*, races 1 et 2).

'Piboule', 'Soldor' et 'Jador' (1983, Institut de recherche Vilmorin, pour ce dernier) n'ont pas eu de développement commercial significatif en raison de la qualité insuffisante de leur fruit liée à la résistance à la race 1-2 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*. Il est toujours très difficile d'avoir des variétés résistantes à la race 1-2 et à fruit ayant une très belle présentation. Il a fallu attendre 7 ans pour réussir à casser partiellement les liaisons génétiques entre ces deux caractères.

1987, '**Margot**' (INRA, France), première variété lignée pure andromonoïque de type charentais, résistante au puceron *Aphis gossypii*. Cette variété a été très utilisée comme géniteur pour l'introduction de cette résistance.

1991, '**Dalton**' (Bio-Obtentions, France), variété hybride F₁ andromonoïque de type brodé français. C'est une des premières variétés inscrites en France portant le caractère d'absence de phase climatérique au cours de la maturation du fruit. Elle a été cultivée à une échelle importante et l'est encore actuellement. Le fruit est de longue conservation (15 jours). Cette variété tardive à fruit très brodé, est la variété à fruit brodé la plus cultivée en France depuis 10 ans.

1993, '**Manta**' (Tézier SA, France), variété hybride F₁ monoïque de type charentais, combinant une bonne tolérance à la race 1-2 de *F. oxysporum* f. sp. *melonis* et un fruit de belle présentation.

1994, '**Lunastar**' (Bio-Obtentions, France), variété hybride F₁ monoïque de type charentais, précoce, dont le fruit est de conservation semi-longue (8-12 jours) produisant un fruit de bonne qualité aromatique et possédant plusieurs résistances (*Fusarium*, oïdium, puceron). C'est la variété la plus cultivée en France depuis 1995 en culture précoce.

1996, '**Cézanne**' (Clause Semences, France), variété hybride F₁ monoïque de type charentais, précoce se distinguant par sa productivité, la bonne conservation (environ 4 à 5 jours) et la bonne qualité de son fruit (couleur, arôme, fermeté de la chair). Elle est très cultivée en France depuis 1996 sous abri et en plein champ sous tunnel « chenille ».

1996, '**Neozym**' (ASL, France), première variété hybride F₁ monoïque de type charentais, résistante, entre autres, au virus de la mosaïque jaune de la courgette. La durée de conservation de son fruit est de 4 jours. Elle n'a pas été commercialisée, faute d'une qualité agronomique suffisante.

1997, '**Radical**' (S & G Seeds BV, Pays-Bas), variété hybride F₁ andromonoïque de type *Galia* à chair blanche, résistante au virus de la criblure du melon.

1998, '**May**' (INRA, France), variété hybride F₁ andromonoïque adaptée à la culture aux Antilles, qui combine les résistances à l'oïdium, au mildiou (*Pseudoperonospora cubensis*) et au chancre gommeux (*Didymella bryoniae*). Le fruit, en outre, a une excellente aptitude au transport et une durée de conservation semi-longue.

1998 '**Gordes**' (Sakata Seed France, France), variété hybride F₁ monoïque de type charentais à maturation groupée, dont le fruit brodé rond se caractérise par

une bonne fermeté, une bonne couleur, une haute teneur en sucre, un bon goût et une longue conservation. L'écorce est verte à maturité.

1998, **'Cyrano'** (Graines Gautier, France), variété hybride F₁ monoïque de type charentais précoce à fruit à écorce « écrite », qui est bien adaptée aux cultures précoces sous grand tunnel ou sous tunnel « chenille ». Le fruit est de calibre élevé, assez clair d'écorce et de bonne qualité gustative. Sa durée de conservation est de 4 jours.

2001, **'Escrito'** (Tézier SA, France), variété hybride F₁ monoïque, de type charentais, assez précoce, à fruit à écorce « écrite ». Le fruit, de calibre moyen homogène, a une très belle présentation avec une écriture fine et couvrante et un sillon régulier coloré et de bonne qualité gustative. Elle est très cultivée actuellement avec une utilisation sous abri tardif.

2001, **'Tolosa'** (Tézier SA, France), variété hybride F₁ monoïque de type charentais, précoce, résistante à toutes les races de *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, à l'oïdium (d'un bon niveau pour *Sphaerotheca fuliginea*, races 1 et 2 et d'un niveau intermédiaire pour *Erysiphe cichoracearum*, race 1) et au puceron (*Aphis gossypii*). Le fruit a une écorce lisse peu jaunissante avec un sillon coloré. Sa durée de conservation est semi-longue d'environ 3/4 jours. La récolte est groupée. Il est cultivé sous abri tardif ou plein champ.

Remarque. En France (où le melon n'est pas indigène), la création variétale a permis d'augmenter la variabilité notamment en utilisant des géniteurs étrangers. La création variétale s'est faite essentiellement dans le cultigroupe charentais qui s'est beaucoup diversifié aussi bien pour les résistances aux maladies que pour la qualité et la présentation du fruit. En revanche, les autres cultigrupes qui étaient cultivés en France jusqu'au milieu du XX^e siècle, ont pratiquement disparu.

Regard sur 50 ans de sélection

L'histoire de l'amélioration du melon dans les cinquante dernières années a été marquée par la sélection pour la résistance aux maladies. À la suite de la découverte de plantes résistantes au *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, races 0 et 2, dans les populations de charentais cultivées en France, des variétés lignées pures ont été commercialisées à partir de 1965 et jusqu'en 1980. Dans les années 1970, pour cumuler plus rapidement et plus facilement des caractères introduits dans des lignées, le passage aux variétés hybrides F₁ s'est imposé progressivement. Pour faciliter la production de semences, les sélectionneurs ont eu recours à la monoécie. Cette évolution a également permis d'améliorer le rendement, la vigueur, la précocité. Les qualités gustatives, de présentation du fruit (couleur de l'écorce et de la chair), l'aptitude à la conservation et au transport ont aussi fait l'objet d'une intense sélection qui a conduit à des progrès très sensibles depuis 1980.

Le second point important est qu'un grand nombre de gènes intéressants comme ceux concernant des résistances aux maladies ont été introduits par

croisements intraspécifiques avec du matériel « exotique » (Inde, Extrême-Orient, par exemple). L'exploitation rapide de la variabilité de l'espèce est toutefois limitée par la spécificité de l'ensemble organoleptique de chaque type, auquel le consommateur est très attaché. Les gènes intéressants doivent donc être transférés dans tous les types de melon.

Les principaux pays où le melon fait l'objet de travaux de sélection sont, outre la France, l'Italie, l'Espagne, les États-Unis, le Japon, la Chine, l'Inde et Israël, chacun travaillant dans le type variétal de son pays.

Caractères importants améliorés

Résistance aux bio-agresseurs. Des résistances aux races 0 puis 1 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, champignon du sol présent dans toutes les zones de production qui imposait une rotation culturale de 15 ans, aux oïdiums (*Sphaerotheca fuliginea* et *Erysiphe cichoracearum*) ont été successivement introduites à partir de géniteurs d'origines variées. L'introduction de la résistance à la colonisation de la plante par un puceron (*Aphis gossypii*) affectant le melon a été aussi une étape déterminante. Des résistances aux virus de la mosaïque du concombre (*Cucumber mosaic virus*, CMV), de la mosaïque jaune de la courgette (*Zucchini yellow mosaic virus*, ZYMV) et de la criblure du melon (*Muskmelon necrotic spot virus*, MNSV) ont ensuite été introduites. Une résistance partielle à la race 1-2 de *F. oxysporum* f. sp. *melonis* n'a été introduite que plus récemment dans quelques variétés, en raison des difficultés rencontrées à cause de la forte liaison de la résistance avec une qualité médiocre de fruit. La structure hybride F₁ facilite le cumul des résistances et accélère leur introduction, au moins pour les résistances dominantes. Certaines variétés ne nécessitent plus aucun traitement phytosanitaire en culture précoce car elles cumulent un grand nombre de résistances essentielles en France (*Fusarium*, oïdiums, puceron). La résistance monogénique (gène *Vat*) au puceron se montre stable depuis 20 ans. Par contre, les résistances à la race 1, puis à la race 2 de l'oïdium (*Sphaerotheca fuliginea*) ont été contournées. Quant aux résistances au *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* (gènes *Fom-1* et *Fom-2*), on peut considérer qu'elles sont aussi contournées, la race 1-2 étant présente et même de plus en plus fréquente. Mais, ces mêmes résistances sont toujours utiles et il est nécessaire que ces gènes soient toujours présents dans les variétés actuelles car la présence de la race 1-2 n'a pas fait disparaître pour autant les races 0 et 1.

Qualité du fruit. Les caractères de résistance à l'éclatement ainsi que l'augmentation de la teneur en sucres (12 %) ont été fortement sélectionnés. Le caractère d'attractivité de la couleur de l'écorce, claire (variété 'Sirio') ou grise (variété 'Tezac') et la couleur de la chair ont aussi été considérés. La vitrescence (aspect « vitreux » de la chair) était présente chez les premiers génotypes monoïques de type charentais où les caractères de monoécie et de vitrescence étaient liés. La rupture de cette liaison a permis d'obtenir des variétés à fruits non vitrescents à partir des années 1990.

Une biologie florale variée

Deux gènes indépendants contrôlent la biologie florale. L'un détermine la présence (allèle *a*) ou l'absence (allèle *a*⁺) d'étamines dans la fleur femelle. L'autre contrôle la présence (allèle *g*⁺) ou l'absence (allèle *g*) de fleur mâle. La combinaison de ces 4 allèles permet de générer 4 phénotypes floraux possibles, parmi lesquels le phénotype monoïque [*a*⁺ *g*⁺] (chaque plante porte des fleurs femelles et des fleurs mâles) et le phénotype andromonoïque [*a* *g*⁺] (chaque plante porte des fleurs hermaphrodites ou bisexuées et des fleurs mâles).

Les melons sauvages sont généralement monoïques tandis que les variétés cultivées sont monoïques ou andromonoïques. Le type charentais est traditionnellement andromonoïque. Pour la fabrication d'hybrides F₁ avec des lignées andromonoïques, il est nécessaire de castrer manuellement les fleurs bisexuées et la pollinisation manuelle est effectuée sous serre. Si on utilise une lignée monoïque comme parent femelle, la castration manuelle n'est plus nécessaire. Par ailleurs, il est possible d'éliminer les fleurs mâles par un traitement avec un précurseur de l'éthylène comme l'éthrel, ce qui permet de produire des semences hybrides avec des insectes pollinisateurs. Toutefois, introduit dans un génotype donné, l'allèle *a*⁺ entraîne la production de fruits plus allongés et plus gros. Il faut donc en tenir compte et sélectionner un contexte génétique adapté en conséquence.

Les lignées gynoïques [*a*⁺ *g*] (c'est-à-dire des plantes ne portant que des fleurs femelles), bien que semblant être les mieux adaptées comme parents femelles, ne sont pas encore utilisées pour la production d'hybrides, car des gènes modificateurs perturbent la biologie florale et les fruits produits présentent des défauts de qualité. La pulvérisation d'inhibiteur de l'éthylène, comme le nitrate d'argent, permet d'induire l'apparition d'étamines et donc d'autoféconder des plantes génétiquement femelles.

Une stérilité mâle nucléaire récessive a été utilisée dans les années 1980. Elle a été ensuite abandonnée car elle n'était pas suffisamment stable (à température élevée, les lignées mâles stériles avaient du pollen viable).

Biologie florale (*cf.* encadré ci-dessus). La monoécie facilite la production de semences hybrides F₁, dont le coût reste très élevé : environ 6 fois plus que celui des lignées pures. Elle a été introduite dans le type charentais dans les années 1980 et elle est presque généralisée chez les variétés inscrites depuis 1990 et utilisée pour d'autres groupes à présent.

Aptitude au transport et à la conservation. Le cultigroupe charentais, qui est le plus demandé par le consommateur français, a pour défaut principal de produire un fruit fragile au transport et d'avoir une faible durée de conservation. Pour remédier à ces défauts, deux stratégies ont été employées : la première a consisté à créer des variétés de type brodé français pour allier la texture de la chair et la saveur du type charentais à la bonne tenue au transport du brodé américain. La deuxième stratégie a consisté à introduire le caractère d'absence de phase climatérique, présent dans certaines variétés du groupe *inodorus* (canari, *Piel de sapo*, *honeydew*, *Tendral*...) dans le cultigroupe charentais. Elle a abouti à des types de longue conservation (l'écorce reste verte et le fruit se conserve une quinzaine de jours à température ambiante) et à des types

intermédiaires (l'écorce jaunit et le fruit se conserve une dizaine de jours à température ambiante). Quelques sélectionneurs ont aussi utilisé des matériels nord-américains et japonais pour introduire d'autres sources de conservation d'intensité moyenne (3 à 4 jours). L'amélioration de la qualité du melon et de son aptitude à être transporté, a conduit à une répartition plus homogène de la consommation du melon en France.

Rendement. Des lignées de haut rendement peuvent être sélectionnées. Cependant, ce sont surtout les hybrides qui ont permis d'améliorer le rendement en culture précoce. Le rendement brut du melon charentais est maintenant de l'ordre de 40 t/ha variant suivant les techniques de culture (grand tunnel, tunnel « chenille », plein champ). Le rendement commercialisable peut être significativement plus faible.

Diversification. Les sélectionneurs français, notamment, travaillent de nombreux types pour les marchés européen, méditerranéen et du Moyen-Orient. Les gènes de résistance aux maladies et les caractères de monoécie et de longue conservation ont été progressivement introduits dans le type brodé italien à chair orange, dans les types espagnols jaune canari et *Piel de sapo* (à chair verte), dans le type *Galia* à chair blanche ou verte et dans les types ananas et turc.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI La diversité morphologique chez <i>Cucumis melo</i> est très grande. Par contre, cette variabilité est basée sur un assez petit nombre de gènes. C'est ainsi qu'un seul gène est impliqué dans la couleur de l'écorce du sillon ou de la chair. Un certain nombre de résistances est gouverné par un petit nombre de gènes : <i>Vat</i> (puceron), <i>Fom-1</i> et <i>Fom-2</i> (<i>Fusarium</i>), <i>Pm-1</i> , <i>Pm-2</i> (oïdium).
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	AUCUN Des essais effectués avec <i>C. ficifolius</i> A. Rich. ont conduit à l'obtention de plantes haploïdes et non pas à des hybrides interspécifiques.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS Des melons tétraploïdes ont été obtenus, mais le projet a été abandonné pour diverses raisons : cycle trop long, problèmes de fertilité et sensibilité accrue à l'éclatement.
Transgénèse	1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1991.

suite...

... suite

ESSAIS en France

Des travaux de transgénèse ont été réalisés en France, mais aucune variété transgénique n'est inscrite ou commercialisée. Parmi eux, on peut citer :

- l'introduction de ribozymes ou bien de gènes codant les protéines capsides contre les virus de la mosaïque du concombre (CMV), de la mosaïque de la pastèque (*Watermelon mosaic virus*, WMV) ou de la mosaïque jaune de la courgette (ZYMV) ;
- le blocage de l'expression du gène de l'acide carboxylique-1-aminocyclopropane synthase (ACC oxydase) à l'aide d'un gène anti-sens chez le type charentais a conduit à l'obtention de plantes à fruit sans phase climatérique ;
- le transfert de gènes issus d'une levure pour induire une tolérance à la salinité.

OUI aux États-Unis

Plus de 100 essais au champ avaient déjà été conduits aux États-Unis en 2000. Actuellement, seules des variétés à fruit de longue conservation, produits par Agritope Inc. sont en voie d'homologation aux États-Unis (cf. encadré p. 447).

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI La multiplication végétative du melon par greffage ou bouturage horticole est possible et facile. C'est pourquoi, elle est parfois utilisée en sélection.
Sélection sanitaire	AUCUNE Toutefois, quelques maladies, comme le virus de la mosaïque de la courge (<i>Squash mosaic virus</i> , SqMV), sont transmissibles par la graine. Ce dernier virus n'étant pas présent en France (en particulier ses vecteurs (coléoptères) n'étant pas présents), seuls les lots de semences importés font l'objet d'une vérification de son absence à l'aide d'un test ELISA.
Haploïdisation	OUI L'induction de plantes haploïdes à l'aide de pollen irradié (gynogenèse <i>in situ</i>) est couramment employée en sélection et pour des études de cartographie.
Recours à la stérilité mâle	OUI ms-5 est un exemple de stérilité mâle nucléaire qui a été utilisée entre 1975 et 1986 ('Jivaro'). Cinq gènes récessifs sont connus.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs moléculaires sont utilisés pour l'évaluation des ressources génétiques. Des cartes saturées ont été élaborées. Des marqueurs de gènes de résistances aux maladies (<i>Fom-1</i> , <i>Fom-2</i> , <i>Vat</i> , <i>nsu</i>) et des QTL de forme et de maturation du fruit ont été identifiés. Ces marqueurs sont en cours d'utilisation pour faire de la SAM. Des gènes ont été clonés par clonage positionnel.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale maternelle Sélection généalogique différée Haplométhode Rétrocroisements Sélection récurrente
Types variétaux	Variété population Variété lignée pure Variété hybride F₁ (type variétal prédominant actuellement). La production de semences est basée sur des systèmes différents : – <i>andromonoécie</i>. Il est nécessaire de castrer manuellement les fleurs bisexuées ; – <i>monoécie</i>. Une pollinisation manuelle sans castration est effectuée ou bien les fleurs mâles peuvent être éliminées par traitement chimique à l'éthrel et pollinisation entomophile ('Alpha',...); – <i>stérilité mâle nucléaire</i> ('Jivaro').

Perspectives d'amélioration

Le melon est caractérisé par l'extrême importance des types variétaux ou culti-groupes. Les Français ne consomment presque que des melons charentais avec quelques variations (écorce plus ou moins brodée, longue conservation). La production du melon en France est stable depuis quelques années et on assiste à une délocalisation des productions de charentais pour les cultures précoces ou à contre saison (Espagne, Maroc, Antilles).

La sélection du melon continue à être active dans plusieurs pays, en particulier en France, en Italie et en Espagne dans l'Union européenne, ainsi qu'en Israël, au Japon, en Chine, en Inde et aux États-Unis.

Enfin, le melon ayant un petit génome, des travaux de génomique sont conduits dans différents pays. Plusieurs gènes ont été clonés soit par homologie, soit par clonage positionnel.

Caractères à améliorer

Qualité du fruit. La conservation du fruit (aspect externe et interne), le développement de la qualité organoleptique doivent être encore améliorés. L'amélioration de l'aptitude à la conservation du fruit s'est accompagnée d'une perte des arômes dans le type charentais. Les sélectionneurs tentent d'y remédier actuellement.

Une carte génétique avec des QTL et des marqueurs de gènes impliqués dans la forme du fruit et ses caractéristiques de maturation vient d'être constituée.

Résistance aux maladies. La recherche et/ou l'introduction de tolérances aux bactérioses (*Pseudomonas syringae* pv. *aptata*), aux nouvelles races d'oïdium, au virus de la mosaïque de la pastèque (*Watermelon mosaic virus*, WMV) et au virus de la jaunisse des Cucurbitacées transmise par pucerons (*Cucurbit aphid-borne yellows virus*, CABYV) sont en cours. Des résistances polygéniques, actives

Changement climatique et nouvelles maladies

Avec le changement climatique et le réchauffement de la planète, des insectes peuvent progresser vers des pays plus septentrionaux en apportant avec eux des maladies. C'est ainsi que des virus transmis par l'aleurode *Bemisia tabaci*, comme le virus du nanisme jaunissant des Cucurbitacées (*Cucurbit yellow stunting disorder virus*, CYSDV) ou le virus du jaunissement des nervures du concombre (*Cucumber vein yellowing virus*, CVYV) que l'on ne connaissait qu'au Proche-Orient, ont fait leur apparition en Espagne, puis en France pour le premier d'entre eux.

contre toutes les races de *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, ainsi que des résistances au mildiou (*Pseudoperonospora cubensis*) sont en cours d'introduction. Le cumul de gènes de résistances aux principaux virus, de résistances aux vecteurs et des pratiques culturales adéquates, devrait permettre d'avoir une protection efficace et durable contre les maladies virales.

Les changements climatiques sont aussi susceptibles de provoquer l'arrivée de nouvelles maladies pour lesquelles il faudra trouver des solutions génétiques (cf. encadré ci-dessus).

Diversification des produits. Bien que le type Cantaloup charentais (lisse ou brodé) soit dominant, l'intérêt se porte sur des types nouveaux pour la France (comme *Tendral* ou jaune canari), alors qu'ils sont traditionnels dans d'autres pays, méditerranéens en particulier.

Techniques à développer

Les marqueurs moléculaires vont être de plus en plus utilisés de même que la SAM. La transgénèse pourrait se développer si des gènes d'intérêt étaient découverts (cf. encadré ci-dessous). Par sélection classique, il a été possible d'obtenir des variétés de melon sans crise climaterique (variété 'Dalton',...) et d'introduire des résistances naturelles aux maladies. Bien que la variabilité de l'espèce soit importante, le recours à la transgénèse pourrait permettre d'introduire des caractères difficiles à sélectionner car oligogéniques (résistance à la mosaïque du concombre) ou des caractères qui ne semblent pas présents dans la variabilité de l'espèce (résistance aux nématodes à galles *Meloidogyne* spp.).

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation dans au moins un pays

Longue conservation par ralentissement de la maturation. Certains cultigrupes comme le charentais ou le Cantaloup américain produisent des fruits à maturation climaterique, c'est-à-dire avec une synthèse auto-catalytique d'éthylène. La stratégie pour retarder le mûrissement du fruit consiste donc à inhiber cette synthèse. En particulier, la méthode proposée par Agritope Inc. (événement 35 1N) repose sur le principe de l'élimination d'un précurseur essentiel de la biosynthèse de l'éthylène, la S-adénosylméthionine (SAM). Le gène du bactériophage T3 codant une S-adénosylméthionine hydrolase (SAMase) est introduit dans les plantes. L'enzyme produite provoque une diminution drastique de la SAM et de l'éthylène.

Inscription et protection des variétés en France

1973, ouverture, par arrêté ministériel, de la liste de variétés de melon dans le catalogue officiel des plantes potagères.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique variétés hybrides pour l'espèce melon.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre annexe des variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 315 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 2 779 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Cette même année, 13 variétés étaient inscrites sur la liste de variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 71 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de deux cycles qui peuvent être effectués sur une seule année. À l'issue de ces deux cycles d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

Site internet de la base de données de la collection française de ressources génétiques : http://www.avignon.inra.fr/rg_melon/public

Anaïs G. et Kaan F., 1978. La sélection de variétés de melon (*Cucumis melo* L.) aux Antilles pour la résistance aux maladies et l'aptitude au transport. *Agron. trop.*, 23, 323-331.

Ano G., Anaïs G. et Chidiac A., 2002. Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe. *Phytoma, Déf. Vég.*, 551, 36-37.

Ayub B., Guis M., Amor B., Gillot L., Roustan J.-P., Latche A., Bouzayen M. et Pech J.-C., 1996. Expression of ACC oxydase antisense gene inhibits ripening of cantaloupe melon fruits. *Nature Biotechnol.*, 14 (7), 862-866.

Baudracco-Arnas S. et Pitrat M., 1996. A genetic map of melon (*Cucumis melo* L.) with RFLP, RAPD, isozymes, disease resistance and morphological markers. *Theor. Appl. Genet.*, 93 (1/2), 57-64.

- Blancard D., Lecoq H. et Pitrat M.**, 1991. *Maladies des Cucurbitacées. Observer, identifier, lutter.* INRA-PHM Revue horticole, Paris, 301 p.
- Bois D.**, 1927. *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture Phanérogames légumières.* Éd. Paul Lechevalier, Paris, tome 1, 199-205.
- Bordas M., Montesinos C., Dabauza M., Salvador A., Roig L.A., Serrano R. et Moreno V.**, 1997. Transfer of the yeast salt tolerance gene *HAL1* to *Cucumis melo* L. cultivars and *in vitro* evaluation of salt tolerance. *Transg. Res.*, 6, 41-50.
- Dong J.Z., Yang M.Z., Jia S.R. et Chua N.H.**, 1991. Transformation of melon (*Cucumis melo* L.) and expression from the cauliflower mosaic virus 35S promoter in transgenic melon plants. *Bio/Technol.*, 9 (9), 858-863.
- Dumas de Vaulx R.**, 1974. Étude des possibilités d'utilisation de la polyploïdie dans l'amélioration du melon (*Cucumis melo* L.). *Ann. Amélior. Plant.*, 24, 389-403.
- Fang G. et Grumet R.**, 1993. Genetic engineering of potyvirus resistance using constructs derived from the zucchini yellow mosaic virus coat protein gene. *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 6, 358-367.
- Guis M., Roustan J.-P., Dogimont C., Pitrat M. et Pech J.-C.**, 1998. Melon biotechnology. *Biotechnol. Genet. Eng. Rev.*, 15, 289-311.
- Huttner E., Tucker W., Vermeulen A., Ignart F., Sawyer B. et Birch R.**, 2001. Ribozyme genes protecting transgenic melon plants against potyviruses. *Curr. Issues Mol. Biol.*, 3, 27-34.
- Jagger I. C. et Scott G. W.**, 1937. Development of powdery mildew resistant cantaloupe No. 45. *USDA Circul.*, 441, 1-5.
- Lasserre E., Godard F., Bouquin T., Hernandez J.A., Pech J.-C., Roby D. et Balague C.**, 1997. Differential activation of two ACC oxidase gene promoters from melon during plant development and in response to pathogen attack. *Mol. Gen. Genet.*, 256 (3), 211-222.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies des Cucurbitacées. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 215-260.
- Odet J.**, 1991. *Le melon.* Éditions Ctifl, Paris, 295 p.
- Guérineau C.**, 1998. *Le melon, pour un produit de qualité.* Éditions Ctifl, Paris, 168 p.
- Oliver J.L., Garcia-Mas J., Cardus M., Pueyo N., Lopez-Sese A.I., Arroyo M., Gomez-Panigua H., Arus P. et Vicente C.M.**, 2001. Construction of a reference linkage map of melon. *Genome*, 44, 836-845.
- Périn C., Hagen L. S., De Conto V., Katzir N., Danin-Poleg Y., Portnoy V., Baudracco-Arnas S., Chadoeuf J., Dogimont C. et Pitrat M.**, 2002. A reference map of *Cucumis melo* based on two recombinant inbred line populations. *Theor. Appl. Genet.*, 104, 1017-1034.
- Périn C., Hagen L. S., Giovinazzo N., Besombes D., Dogimont C. et Pitrat M.**, 2002. Genetic control of fruit shape acts prior to anthesis in melon (*Cucumis melo* L.). *Mol. Genet. Genom.*, 266, 933-941.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Pitrat M.**, 2003. Melons, concombres et pastèques. Dans : *Histoires de légumes. Des origines à l'orée du XXI^e siècle.* M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 291-309.
- Pitrat M. et Risser G.**, 1992. Le melon. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées.* A. Galais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 448-459.
- Pitrat M.**, 2005. Ressources génétiques, diversité et amélioration du melon. *Sél. Fr.*, 55, 3-12.
- Plagès J.-N.**, 1997. L'avenir des variétés génétiquement modifiées pour la résistance aux virus (un exemple développé par Limagrain). *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 83, 161-164.
- Sauton A. et Dumas de Vaulx R.**, 1987. Obtention de plantes haploïdes chez le melon (*Cucumis melo* L.) par gynogenèse induite par du pollen irradié. *Agronomie*, 7, 141-147.
- Yoshioka K., Hanada K., Nakazaki Y., Minobe Y., Yakuwa T. et Oosawa K.**, 1992. Successful transfert of the Cucumber mosaic virus coat protein gene in *Cucumis melo* L. *Jap. J. Breed.*, 42, 277-285.

Le merisier

Prunus avium L. ($2n = 2x = 16$)
(Rosacées)

Présentation de l'espèce

La présence de merisier, *Prunus avium* L., en Europe est attestée, par différentes découvertes archéologiques, dès le Néolithique. Le merisier a, dans un premier temps, été essentiellement cultivé pour ses fruits. Les premières traces de sa culture ont été trouvées en Asie mineure et remontent au IV^e siècle avant notre ère. Le merisier sauvage, utilisé en reboisement pour la production de bois, n'est amélioré que depuis une trentaine d'années tandis que sa forme domestiquée, le cerisier doux appartenant à la même espèce, *Prunus avium* cultivé pour ses fruits, a un long passé en sélection.

Le merisier est une espèce forestière peu longévive (durée de vie moyenne de 100 ans). Elle est monoïque, allogame stricte avec un système d'incompatibilité et entomophile. Elle se multiplie, soit de façon sexuée par graines, soit végétativement par de fréquents drageons qui produisent des colonies d'individus identiques. Le merisier forestier est susceptible d'être pollinisé par sa forme domestiquée, le cerisier doux, mais aussi par le cerisier à fruit acide, *Prunus cerasus* L.

Sachant que la culture du merisier à bois ne doit pas être confondue avec celle du cerisier à fruit doux, ce dernier fait l'objet d'une sélection particulière qui ne sera pas décrite dans cette fiche. Par ailleurs, le merisier est traditionnellement aussi utilisé comme porte-greffe pour la production de scions de variétés fruitières. Cet aspect est traité dans la fiche « Les porte-greffe de *Prunus* » (cf. p. 639).

Le merisier est un arbre dont l'aire de répartition est très étendue en Europe. Des merisiers sont rencontrés jusqu'à 61 ° de latitude Nord et dans le nord du Maghreb et de la Sibérie occidentale au littoral de l'Atlantique. C'est une essence disséminée, dont la densité peut être très variable en forêt.

La diversité génétique de l'espèce est en cours d'étude par l'INRA, l'ONF et le CEMAGREF. Des plantations conservatoires *ex situ* ont été installées par le

CEMAGREF dans les régions où la densité du merisier est faible (Bretagne, Midi-Pyrénées). Une réflexion est engagée quant à la mise en œuvre d'un réseau de conservation *in situ*.

Production et utilisation

Le produit noble récolté est le fût (ou tronc).

La France possède une surface boisée en merisier d'environ 38 000 ha dont près de 7 100 ha de plantations. Le volume sur pied pour la France est de près de 16 millions de m³ (données IFN, mise à jour 2003). Les pépinières forestières ont commercialisé entre 1,3 et 1,5 million de plants de merisier par an jusqu'en 1999, 770 000 l'ont été en 2000 et 600 000 en 2004.

Le merisier est un arbre à fût droit et cylindrique à croissance rapide qui atteint en moyenne entre 20 et 25 mètres de hauteur et 60 cm de diamètre. L'âge d'exploitabilité est de 60 ans en moyenne. Le merisier est cultivé pour son bois de dureté moyenne, de grain fin et de très bonne qualité technologique qui lui permet d'être apprécié pour de nombreux usages tels que la fabrication de meubles en bois massif ou le placage. Au cours de l'histoire, le bois de merisier a été utilisé aussi en lutherie, en tonnellerie, pour la fabrication de pipes et de brosses, etc. Le bois de merisier a longtemps été traité à l'eau de chaux pour lui faire prendre une teinte rouge vif.

Il faut distinguer la production traditionnelle, à partir de merisiers présents naturellement dans les haies, les bois et les forêts, de la production à partir de plantations qui est assimilable à de la culture. Ces plantations de merisier se sont développées en France à partir des années 1970-1980 avec un objectif de production rapide de bois de haute valeur marchande. Il s'agit de plantations pures de merisier ou d'enrichissement de peuplements feuillus appauvris, mais sur d'assez bonnes stations. Le « bois de merisier » vendu en France est en réalité à 80 % du cerisier noir, *Prunus serotina* Ehrh., importé des États-Unis, car les grumes de « merisier vrai » de bonne qualité (c'est-à-dire ayant bénéficié d'une bonne sylviculture) sont rares.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés récentes

Années 1980, '**Lilienthal**', variété issue d'un des vergers à graines de clones non testés allemands. Elle est couramment utilisée en France et sert de témoin dans les nouveaux tests installés ces dernières années (après 2000).

Années 1990, sélection des meilleurs peuplements forestiers en France et en Allemagne admis comme peuplements porte-graines en catégorie sélectionnée. En France, on parlait alors de « peuplements classés » : ce terme désignait dans l'ancienne réglementation, valable jusqu'en octobre 2003, les peuplements

admis comme matériels de base pour la production de matériels sélectionnés (graines et plants) (cf. ancien Article R 552-2 du Code forestier Livre V Titre V). Cette dénomination spécifiquement française n'a pas été reprise dans la nouvelle réglementation nationale. On doit maintenant parler de « peuplements porte-graines sélectionnés » ou « en catégorie sélectionnée ». Il y a 97 peuplements porte-graines admis en catégorie sélectionnée dans une seule région, de provenance unique PAV901-France.

1994, '**Pierval**', '**Beauvoir**', '**Ameline**', '**Bonvent**', '**Hautmesnil**', '**Coulange**', '**Monteil**', '**Gardeline**' (INRA, France), variétés clones (multipliées par voie végétative) utilisées en mélange de 5 afin de minimiser les risques phytosanitaires. Ces variétés clones se caractérisent par une bonne croissance en hauteur et en diamètre, une bonne résistance à l'antracnose et une forme correcte. Seules les 3 dernières variétés clones seront définitivement inscrites en 2006 et 7 nouvelles variétés sont proposées.

1997, '**Cabreret**' (INRA / GIE Vilmorin ONF, France), verger à graines de clones testés, composé de 20 clones de bonne croissance et peu sensibles à l'antracnose, installé à Cabreret (Lot) et productif depuis 2005.

2004, '**Avessac**' (INRA / GIE Vilmorin ONF, France) verger à graines composé de 35 clones de bonne croissance, de bonne forme et peu sensibles à l'antracnose, installé à Avessac (Loire-Atlantique), production prévue vers 2009.

2005, 7 nouvelles variétés clones proposées (INRA, France), sélectionnées pour une bonne croissance en hauteur et en diamètre, une bonne résistance à l'antracnose et une bonne forme.

Remarque. De très nombreux peuplements porte-graines ont été sélectionnés, mais très peu d'entre eux sont récoltés. De plus, certaines années aucun peuplement n'est récoltable. Cette situation s'améliorera dès que les vergers à graines entreront en production, car ils sont composés de clones provenant de toute la France. Les variétés clones sont en faible nombre, mais sont destinées à de faibles surfaces totales car elles s'adressent à des forestiers pratiquant une sylviculture intensive.

Regard sur 50 ans de sélection

La sélection du merisier pour la production de bois est assez récente puisqu'elle n'a que 30 ans. Seule, l'Europe semble s'intéresser à cette espèce, mais c'est le cas de six pays européens, au moins. Le progrès est surtout venu d'une évolution dans les structures variétales avec la mise en place d'une réglementation au niveau national, puis européenne (cf. p. 458) et donc d'une information sur la localisation et le type de matériel de base dont sont issus les plants et le niveau de sélection.

Avec le début des plantations, est apparu le problème de l'approvisionnement en plants. Ceux-ci ont été initialement produits par voie sexuée à partir de

graines. En l'occurrence, des noyaux ont été récupérés dans des confitureries (donc provenant de cerises douces ou acides) et dans des distilleries (donc provenant de merises) françaises ou européennes entre 1970 et 1984. Dans tous les cas, il s'agissait de variétés sélectionnées pour la production de fruits plutôt que pour les critères recherchés par les forestiers (bonne rectitude du tronc et branchaison favorable). Conscients de ce problème et en attendant la mise en place d'une réglementation pour cette espèce, à partir de 1984, des marchands grainiers privés ont effectué, en coopération avec les Centres régionaux de la propriété forestière (CRPF) et l'Institut pour le développement forestier (IDF), des récoltes sur des peuplements forestiers de très bonne qualité (ils seront pour la plupart admis en catégorie sélectionnée en 1989) principalement dans les régions Picardie et Champagne-Ardenne. En Allemagne, aux Pays-Bas et en Belgique, une partie de l'approvisionnement en merises a été assurée depuis les années 1970 et surtout 1990 par des vergers à graines non testés, mis en place par les services de la recherche forestière.

En 1989, des peuplements remarquables, repérés en forêt par le CEMAGREF, ont été inscrits comme « peuplements classés » au registre national des matériels de base, en catégorie sélectionnée (comparable au catalogue officiel pour d'autres espèces). Cependant, les récoltes sont aléatoires en raison de problèmes climatiques ou parasitaires. Ceci a impliqué beaucoup de récoltes en dérogation et d'importation de graines, en particulier des vergers à graines allemands.

Simultanément, 350 arbres ont été sélectionnés dans les forêts françaises par l'INRA de 1978 à 1993 pour constituer la collection de base du programme d'amélioration. Ils sont en cours de test depuis 1982 sur des critères agronomiques (adaptabilité multisites, vigueur, forme, résistance à l'antracnose...). Sur la base de ces tests, 8 variétés clones produites par voie végétative par différentes techniques de bouturage (bouturage horticole et culture *in vitro*) ont été déposées au CTPS en 1994 et deux autres en 2004. Deux vergers à graines ont été constitués en 1994 et 2004. La production de ces deux vergers à graines est très attendue.

Caractères importants améliorés

Adaptabilité. Des variétés possédant une bonne adaptabilité à différentes conditions pédoclimatiques ont été sélectionnées grâce à des expérimentations multi-sites.

Productivité. Le progrès en productivité (gain en surface terrière, sachant que la surface terrière est l'aire géométrique de la section transversale du tronc, sur écorce, soit à 1,30 m du niveau de base) pour les variétés clones INRA a été évalué de 25 % à 90 % dans deux plantations expérimentales.

Résistance aux maladies. L'antracnose est une maladie foliaire causée par un champignon, *Blumeriella jappii*, qui est susceptible d'occasionner des ralentisse-

ments importants de croissance, particulièrement en diamètre, en raison de la réduction de la surface foliaire.

Forme. La forme recherchée est une bonne rectitude, un rapport hauteur sur diamètre ni trop bas ni trop élevé, des branches les plus horizontales possibles et un rapport entre le diamètre des branches et du tronc le plus faible possible.

Difficultés et obstacles

Difficulté d’approvisionnement. Les solutions retenues pour compenser la pénurie de plants de variétés françaises ont été des autorisations ponctuelles de récolter des merises en peuplements forestiers non classés et des autorisations d’importation de merises produites dans des peuplements ou vergers à graines allemands (le merisier n’était pas alors soumis à réglementation en Allemagne).

Diffusion variétale. Les plants de variétés clones, plus coûteux, sont encore très peu commercialisés, en attendant un réseau suffisamment conséquent de dispositifs de démonstration.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D’INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	AUCUN en France Aucune variété cultivée pour le bois en France ne semble être issue de croisement interspécifique. OUI à l’étranger Au Royaume-Uni, quelques croisements interspécifiques ont été réalisés, notamment avec <i>P. sargentii</i> Rehder, espèce originaire d’Extrême-Orient utilisée comme cerisier d’ornement et avec une espèce forestière, le cerisier noir (<i>P. serotina</i>), et les rétrocroisements sont en cours.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	NON Mais, il se trouve qu’un des arbres de la population améliorée s’est avéré triploïde.
Transgénèse	AUCUNE
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Le greffage permet la création de collections et de vergers à graines. Le bouturage de drageons d’arbres sélectionnés permet le développement de variétés clones (‘Pierval’, ‘Beauvoir’, ‘Bonvent’,...). La culture <i>in vitro</i> est quelquefois utilisée pour multiplier les clones en vue de la diffusion de variétés clones. <i>suite...</i>

... suite

Haploïdisation	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Le merisier possède une auto-incompatibilité d'origine gamétophytique qui a l'avantage d'éviter les autofécondations dans les vergers à graines. Cependant, cette auto-incompatibilité est la cause de quelques « trous » dans les plans de croisements, lorsque des croisements contrôlés sont réalisés dans le cadre d'une sélection récurrente.
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs RFLP ont été utilisés dans le cadre de la recherche de QTL de résistance à l'anthracnose. Depuis 2000, il est possible d'identifier les variétés clones grâce à des microsatellites et des isozymes. Les marqueurs isozymatiques sont utilisés, depuis plus longtemps, pour gérer les ressources génétiques (taches clonales en forêt, repérage de doublons,...).

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Pour la sélection de variétés clones, les clones sont sélectionnés sur leur valeur propre après multiplication végétative. Ils sont ensuite plantés en multi-copies (15 à 18) sur plantations multisites. L'observation dure au minimum 7 ans. Pour la création de vergers à graines, après vérification du lien important entre valeur propre et valeur en croisements, des vergers à graines sont composés avec des clones à valeur propre élevée.
Types variétaux	Variété population. Les semences sont des noyaux issus des confitureries et des distilleries ou de peuplements forestiers non sélectionnés. Peuplement porte-graines sélectionné (anciennement « classé »). Il s'agit de la sélection des meilleurs peuplements forestiers de chaque région. Verger à graines de clones non testés. Les graines sont récoltées sur des clones rassemblés dans un verger. Les valeurs clonales ou en descendance ne sont pas testées. Verger à graines de clones testés (équivalent à une variété synthétique de clones). Les valeurs clonales ou en descendance sont testées. Le verger à graines est admis en catégorie qualifiée avant d'être en catégorie testée. Variétés clones utilisées en mélange. Les variétés clones sont admises individuellement, mais le conseil d'utilisation usuel est le mélange de 5 variétés clones. Pour un enrichissement ponctuel en forêt, une seule variété clone suffit.

Perspectives d'amélioration

En France comme dans la plupart des pays européens, des variétés sont diffusées (vergers à graines, variétés clones) pour garantir l'approvisionnement en plants et la qualité des plantations, car il est très délicat de réussir des régénérations naturelles (appétence pour le gibier) et de récolter des peuplements porte-graines.

Le merisier ne peut donner un bois de qualité qu'avec un suivi sylvicole (soin de la plantation, protections contre le gibier, contrôle de l'herbe et des repousses forestières, taille de formation et élagages). De nombreuses plantations échouent en raison d'un mauvais choix de la station ou d'un manque de soin, ce qui a d'ailleurs fait diminuer le volume des plantations depuis quelques années. Par contre, les sylviculteurs consciencieux peuvent retirer un gain financier important de leur plantation, et ce d'autant plus qu'ils auront un bon matériel génétique.

Le souci est donc de créer un matériel non seulement de bonne croissance (pour garantir le gain financier, mais aussi de bonne forme (ce qui facilite les soins) pour que le produit final soit commercialisable rapidement et avantageusement.

Caractères à améliorer

Architecture. Des variétés toujours plus droites, avec peu d'accidents de cime, aux branches à insertion la plus horizontale possible et proportionnellement fines pour faciliter l'élagage, sont recherchées. Cependant, la sélection pour la finesse des branches s'avère délicate car ce caractère est corrélé négativement avec la croissance en hauteur et en diamètre.

Résistance aux maladies. Parallèlement aux sélections contre la sensibilité à l'anthracnose, une attention particulière est prêtée à une bactériose causée par *Pseudomonas syringae*, qui occasionne des chancres parfois mortels sur les branches et le tronc, quand le climat lui est favorable.

Qualité du bois. Ce critère commence tout juste à pouvoir être pris en compte grâce à l'analyse des premières éclaircies dans les plus anciennes plantations comparatives. La caractérisation du bois des variétés est orientée par son utilisation en ébénisterie (problèmes de coloration, de bois de tension, de cicatrisation des branches).

Méthodes à développer

La multiplication végétative, spontanée chez le merisier, a été développée en conditions horticoles et *in vitro*, car elle permet de multiplier les individus les plus performants. De nouveaux ajustements sont toujours nécessaires avec les nouvelles variétés, bien que la technique soit bien maîtrisée. Le coût de production des plants par multiplication végétative est de toute façon plus élevé que par graines, ce surcoût étant compensé par l'intérêt de plants issus de variétés clones.

En France, il existe des études de cartographie génétique sur le cerisier à fruit doux, mais le marquage moléculaire n'est pas aujourd'hui utilisé dans la sélection du merisier. Le séquençage du génome du pêcher (*P. persica* (L.) Batsch), autre espèce de *Prunus*, a été entrepris aux États-Unis.

Il est nécessaire de développer des méthodes pour caractériser la qualité du bois : proportion de bois de cœur, couleur du bois de cœur, retrait, caractères anatomo-

miques, formation du bois de tension, formation de bois figuré (c'est-à-dire présentant des sinuosités) très rare chez le merisier.

Inscription et protection des variétés en France

La production de plants correspondant aux clones de la collection d'amélioration INRA s'est développée dans les années 1980 avant la mise en place de la réglementation sur la commercialisation des matériels forestiers de reproduction (intégrée dans le code forestier et prise en application de la Directive européenne 66/404/CEE datant de 1966, qui a été ensuite remplacée par la Directive 99/105/CE entrée en vigueur en 2003).

1989, arrêté du 29 juin 1987 avec entrée en vigueur pour le merisier au 1^{er} juillet 1989 : mise en place de la réglementation nationale et ouverture du catalogue national pour les plants de merisier issus de graines.

1989, le merisier qui ne faisait pas partie des espèces soumises à titre obligatoire à la Directive 66/404/CEE, y a été soumis cette année-là à titre volontaire, dans quelques pays dont la France, la Belgique et le Royaume-Uni.

1993, règlement technique d'admission des variétés clones en catégorie testée (arrêté du 21/12/1993).

1994, ouverture du registre national pour les 8 clones de merisier de catégorie contrôlée (arrêté du 14/09/1994).

1999, règlement technique d'admission de clones de merisier destinés à la production, par voie végétative, de matériels forestiers de reproduction de merisier en catégorie testée. Le merisier figure maintenant dans la liste des 47 espèces soumises à la Nouvelle Directive de 1999.

2003, entrée en vigueur en France de la nouvelle réglementation européenne sur le commerce des graines et des plants forestiers (matériels forestiers de reproduction) qui remplace la précédente.

Pour en savoir plus

Arbez M. et Lacaze J.-F., 1998. *Prunus avium* – Merisier. Dans : *Les ressources forestières en France*. Tome 2 : *les feuillus*. INRA Éditions, Paris, 227-235.

Arus P., Messeguier R., Viruel M., Tobutt K., Dirlwangler E., Santi F., Quarta R. et Ritter E., 1994. The european *Prunus* mapping project. Progress in the almond linkage map. *Euphytica*, 77, 97-100.

Boulet-Gercourt B., 1997. *Le merisier*. IDF, Paris, 128 p.

Balsemin E., Mariette S., Le Boulter H., Santi F., Tavaud M. et Verger M., 2002. Is there panmixis in experimental seed orchards of *Prunus avium* L.? International conference *Dynamics and conservation of genetic diversity in forest ecosystems*, Strasbourg, 2-5 dec. 2002 (poster et résumé).

Cazet M., Dufour J. et Verger M., 1993. Multiplication du merisier par bouturage herbacé. *PHM Rev. Hortic.*, 338, 27-30 et 339, 11-13.

Colin E., Bilger I. et Héois B., 1998. Conservation des ressources génétiques du merisier. *Forêt Entr.*, 120, 59-64.

- Ducci F. et Santi F.**, 1997. The distribution of clones in managed and unmanaged populations of wild cherry (*Prunus avium* L.). *Can. J. For. Res.*, 27, 1998-2004.
- Dufour J., Muranty H., Prado E. et Bastien J.-C.**, 1999. Les clones de merisier inscrits au catalogue : obtention, performances et conseils d'utilisation. *Forêt Entr.*, 125, 58-63.
- Frascaria N., Santi F. et Gouyon P.H.**, 1993. Genetic differentiation within and among chesnut (*Castanea satia* Mill.) and wild cherry (*Prunus avium* L.) populations. *Heredity*, 70, 634-641.
- Héois B., Collin E., Legrand P., Bilger I., Frascaria N. et Santi F.**, 1996. Conservation of *Prunus avium* genetic resources in France. Dans : *Noble Hardwood Network*. J. Turok, G. Eriksson, J. Kleinschmit, S. Canger, éd., IPGRI, Rome, 16-22.
- Lemoine M., Dufour J. et Santi F.**, 1992. Le merisier. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 684-693.
- Muranty H., Goffinet B. et Santi F.**, 1997. Multitrait and multipopulation QTL search using selective genotyping. *Genet. Res.*, 70, 259-265.
- Muranty H., Santi F., Paques L. et Dufour J.**, 1996. Étude du nombre optimal de ramets par clone dans 2 tests clonaux. *Ann. Sci. For.*, 53, 123-138.
- Santi F., Dufour J., Pâques L.-E. et Bastien J.-C.**, 2001. Quel gain espérer en plantant des variétés clones de merisier? *Forêt Entr.*, 139, 8-12.
- Santi F., Russell K., Menard M. et Dufour J.**, 2004. Screening wild cherry (*Prunus avium*) for resistance to bacterial canker through laboratory and field tests. *For. Pathol.*, 349-362.
- Tessier du Cros E. et Bastien C.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres forestiers. *Sél. Fr.*, 53, 103-114.

Le noisetier

Corylus avellana L. ($2n = 2x = 22$)
(Bétulacées)

Présentation de l'espèce

Le noisetier, coudrier ou avelinier est une espèce polymorphe, qui comprend trois groupes auparavant distingués comme espèces. *Corylus avellana* L. *sensu stricto* est un arbuste à fruit à involucre court et profondément divisé, laissant tomber le fruit à maturité. Il est sauvage dans toute l'Europe et a été abondamment cueilli depuis la Préhistoire. *C. pontica* K. Koch est un arbuste (3-5 m) qui donne de petits fruits à involucre tubulaire, et est originaire de Turquie et des bords de la mer Noire. *C. maxima* Miller a des fruits à involucre tubulaire et rétréci au-dessus du fruit, ce qui fait que le fruit reste enserré dans l'involucre à maturité ; c'est un arbre qui peut atteindre 10 m de haut et qui est commun dans les Balkans. On ignore où le noisetier a été domestiqué, mais très tôt dans l'Antiquité, des variétés cultivées du type *C. maxima* ont été introduites en Europe de l'Ouest, où elles se sont croisées avec les noisetiers indigènes. Actuellement, le noisetier est présent dans toutes les campagnes françaises et fait l'objet d'une culture intensive dans le Sud-Ouest.

Le noisetier est une espèce pérenne, allogame, monoïque et multipliée végétativement sur ses propres racines.

Les ressources génétiques noisetier de l'INRA ont été transférées aux premières générations de multiplication des plants certifiés et à Montesquieu (Lot-et-Garonne) au Conservatoire végétal régional d'Aquitaine (CVRA). Les conservatoires de l'IRTA à Reus en Espagne et celui de l'université de Corvallis (Oregon) aux États-Unis possèdent, en outre, une grande partie du matériel français, italien, espagnol et turc.

Production et utilisation

Le produit récolté, la noisette, est un fruit sec indéhiscant (akène ou nucule) entouré d'un involucre foliacé et le produit consommé, l'amandon, est une graine.

La production mondiale de noisette dépasse 680 000 tonnes. La Turquie, avec une production de 425 000 t, est le leader du marché. L'Italie, les États-Unis et l'Espagne, trois autres importants pays producteurs de noisette, ont respectivement une production de 134 000 t, 33 000 t et 14 000 t. La production française de noisette (5 700 t) est beaucoup plus faible (données FAO, 2004). Cependant, la France s'étant spécialisée dans la noisette en coque, elle joue un certain rôle à l'exportation sur ce créneau.

La noisette est essentiellement destinée à l'alimentation humaine. Son amandon contient une teneur exceptionnelle en lipides (autour de 60 % du poids sec) et en protéines (autour de 15 %). Il est aussi très riche en sels minéraux (potassium, phosphore, magnésium et calcium) et en vitamines (E, B et C). La teneur assez élevée en fibres, la richesse en magnésium et la richesse en acides gras mono-insaturés de la noisette lui confèrent des propriétés bénéfiques pour la santé au niveau cardiovasculaire.

La noisette peut être commercialisée :

- soit « en coque ». Cette forme de commercialisation ne concerne que 5 % du marché français. Bien que la noisette « en coque » soit surtout consommée après séchage, une petite partie de la production est néanmoins commercialisée en frais, avec la noisette présentée dans son involucre ;
- soit « sans coque », c'est-à-dire décortiquée. Il s'agit du marché le plus important de la noisette (95 %). Le cassage permet de récupérer l'amandon de la noisette. La noisette « sans coque » est utilisée dans des produits agro-alimentaires, principalement la chocolaterie, sous forme entière, d'éclats ou de poudre. La noisette sans coque est aussi recherchée pour la parfumerie alimentaire, l'huilerie, la biscuiterie, les glaces et la cosmétique.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

'Fertile de Coutard', variété très ancienne, productive, à gros amandon de qualité moyenne assez peu atteinte par le phytopte et assez sensible à la bactériose. Son rendement en amandon (proportion d'amande comestible contenue dans le fruit après séchage, exprimée en pourcentage par rapport au poids total du fruit) est assez faible : 39-44 %. Cette variété a été très cultivée aux États-Unis (sous le nom de 'Barcelona'), mais aussi en Corse et dans les Pyrénées-Orientales. Dans le sud-ouest de la France, elle représente encore 15 % du verger en production.

'Merveille de Bollwiller' (Weissman, France), variété à gros fruit créée il y a 130 ans, dont l'origine alsacienne est controversée, se distinguant par une grande rusticité (moindre sensibilité aux maladies cryptogamiques, au phytopte et au balanin). Elle possède une bonne résistance au froid. Son rendement en amandon est faible : 36-41 %. Elle est surtout utilisée comme pollinisateur à floraison tardive.

‘Pauetet’, variété sélectionnée il y a environ un siècle en Espagne. Elle est vigoureuse, productive, produisant un petit fruit destiné au cassage, d’une excellente qualité gustative. Elle est actuellement la principale variété d’industrie plantée en France.

Variétés récentes

1973, **‘Segorbe’**, variété d’origine génétique inconnue qui a été testée et préconisée par l’INRA. Elle se distingue par une grande vigueur et une forte productivité. Cette variété est assez rustique, peu sensible au gel de printemps et produit un amandon de qualité pouvant satisfaire le marché avec ou sans coque.

1980, **‘Ennis’** (université de l’Oregon, États-Unis), variété de semis de hasard très productive et possédant un très gros fruit de belle présentation dont l’amandon de qualité moyenne est difficilement mondé.

1980, **‘Butler’** (université de l’Oregon, États-Unis), variété de semis de hasard, à gros fruit légèrement allongé, très productive notamment dans le nord de la France, utilisé surtout comme pollinisateur à floraison mâle assez tardive.

1987, **‘Fercoril’** (INRA, France), variété productive à très gros fruit donnant un amandon de très bonne qualité. Cette variété est à la base de la quasi-totalité des nouvelles noiseraies plantées en France pour la production de noisette de table. Cette variété est commercialisée sous la marque Corabel®.

1990, **‘Willamette’** (université de l’Oregon, États-Unis), variété hybride donnant une noisette se blanchissant bien, idéale pour l’industrie, mais dont un pourcentage non négligeable de fruits restent adhérents au fond de leur involucre à maturité.

1997, **‘Lewis’** (université de l’Oregon, États-Unis), variété hybride très productive, à maturité précoce et tolérante au champignon pathogène indigène des États-Unis *Anisogramma anomala*. La noisette produite est adaptée à l’industrie.

1999, **‘Clark’** (université de l’Oregon, États-Unis), variété hybride d’industrie dont les caractéristiques sont proches de celles de ‘Lewis’. Elle présente notamment une bonne tolérance à *Anisogramma anomala*.

Remarque. La création variétale a débouché sur la sélection d’un petit nombre de variétés qui se sont ajoutées à la biodiversité existante. C’est ainsi que dans le grand sud-ouest de la France, qui assure 90 % de la production française, des variétés anciennes et nouvelles sont cultivées : ‘Ennis’ 24 %, ‘Fertile de Coutard’ 12 %, ‘Fercoril’ 23 %, ‘Segorbe’ 13 %, ‘Pauetet’ 24 % et autres, dont les pollinisateurs 4 % (source : Coop. Unicoque, 2002). De plus, les problèmes de pollinisation du noisetier obligent les arboriculteurs à associer variété principale et pollinisateurs dans leurs vergers. Pour réduire les risques d’alternance de production, il est recommandé, au niveau de l’exploitant, de s’appuyer sur plusieurs variétés principales.

Regard sur 50 ans de sélection

L'amélioration du noisetier a seulement 30 ans d'existence et a été conduite principalement dans 3 centres : l'université de Corvallis en Oregon (États-Unis), l'université de Turin (Italie) et l'INRA de Bordeaux (Gironde). La sélection au niveau mondial s'est attachée à produire des variétés à haute productivité, donnant un fruit de grande qualité et adapté au principal débouché : l'industrie. La sélection française s'est démarquée de celle des autres pays en créant du matériel particulièrement bien adapté à la production de noisette de table. Ces travaux ont permis d'engager la culture du noisetier en France alors qu'elle était pratiquement inexistante dans les années 1970, et de prendre une part importante du marché de la noisette « en coque ».

Les programmes français et italiens ont été arrêtés. Ces dernières années, le principal critère amélioré a été la résistance à *Anisogramma anomala*, maladie fongique indigène des États-Unis causant de gros dégâts sur *Corylus avellana* dans ce pays. Les variétés récemment sélectionnées sont peu nombreuses en raison du faible investissement de recherche et parce que les caractères d'intérêt du noisetier sont polygéniques et relativement difficiles à transmettre au travers des programmes de sélection.

Caractères améliorés

Productivité. Certaines variétés ont une productivité annuelle pouvant atteindre 8 kg/arbre (en fonction de la densité de plantation).

Qualité du fruit. Les variétés sélectionnées depuis 1970 produisent toutes une noisette de bonne qualité gustative.

Adaptation à l'industrie. De nombreux produits agro-alimentaires sont réalisés à base de noisette. Il a fallu créer des variétés adaptées aux différentes applications industrielles. Les sélectionneurs ont ainsi obtenu des variétés dont le fruit a un bon rendement en amandon et dont l'amandon se comporte bien au blanchiment.

Résistance aux maladies. Certaines maladies sont susceptibles de causer de grosses pertes de productivité. Les variétés récemment sélectionnées sont peu sensibles aux principaux bio-agresseurs du noisetier :

- *acarier des bourgeons ou phytopte du noisetier* (Eriophyes avellanae). Cet acarien, en détruisant les bourgeons, est susceptible d'entraîner des pertes de production de l'ordre de 20 % ;
- *balanin des noisettes* (Balaninus nucum). Ce charançon pique la jeune noisette pour pondre. La larve de cet insecte consomme l'amandon de la noisette qui tombe avant maturité. Dans les cas les plus extrêmes, des pertes de productivité de 70 % sont observées ;
- *Anisogramma anomala*. Ce champignon provoque une très grave maladie sur le noisetier dans certaines régions des États-Unis, principalement en Oregon.

Des variétés récentes tolérantes à cette maladie devraient permettre de continuer à cultiver le noisetier dans les zones infestées.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	OUI L'université de Turin (Italie) a obtenu des clones moins drageonnants de la variété 'Tonda Gentile delle Langhe'.
Croisements interspécifiques	OUI Il existe des possibilités de croisements avec des espèces sauvages, notamment avec le noisetier de Byzance, <i>C. colurna</i> L., et le noisetier de Chine, <i>C. chinensis</i> Franch., pour l'obtention de porte-greffe non drageonnants. Deux porte-greffe de ce type ont été sélectionnés par l'université de Corvallis en Oregon. Le noisetier à feuilles laciniées, <i>Corylus heterophylla</i> Fisch ex Trautv., est utilisé en Corée comme géniteur dans des croisements avec <i>C. avellana</i> pour obtenir des géotypes très résistants aux grands froids hivernaux.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	AUCUNE
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Le marcottage est utilisé pour la multiplication de variétés sélectionnées. Le bouturage et le drageonnage sont deux autres techniques horticoles de multiplication végétative qui fonctionnent assez bien. La multiplication <i>in vitro</i> a été utilisée pour la multiplication accélérée de pieds-mères producteurs de marcottes ('Fercoril', 'Pauetet').
Sélection sanitaire	OUI La thérapie a été utilisée pour l'assainissement vis-à-vis du virus de la mosaïque du pommier en 1975 ('Impériale de Trébizonde', 'Négret',...).
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	Une auto-incompatibilité de type sporophytique avec dominance ou codominance allélique au niveau du pollen constitue une contrainte à l'amélioration du noisetier, l'autofécondation ainsi qu'un certain nombre de croisements étant impossibles. Cette auto-incompatibilité oblige à avoir recours en verger à des pollinisateurs.

suite...

... suite

Marquage moléculaire	OUI Il existe quelques marqueurs enzymatiques. Des marqueurs moléculaires de type RAPD ont été identifiés pour le caractère d'auto-incompatibilité et la résistance à <i>Anisogramma anomala</i> .

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Des hybridations intraspécifiques sont réalisées. Les descendances obtenues sont étudiées en parcelles de sélection, ce qui permet une présélection des génotypes présentant les caractères recherchés. Ces présélections sont marcottées et placées en expérimentation multilocale. Cela permet de faire la sélection finale et de multiplier les génotypes retenus par marcottage après avoir réalisé une multiplication accélérée des pieds-mères par multiplication végétative <i>in vitro</i> .
Types variétaux	Variété clonale

Perspectives d'amélioration

Seuls les programmes des États-Unis (université de Corvallis) et dans une moindre mesure, ceux de Turquie (Institut de Giresun) sont poursuivis à l'heure actuelle. Les perspectives d'amélioration de cette espèce au niveau mondial sont donc limitées.

Inscription et protection des variétés en France

1970, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste noisetier dans le catalogue arbres fruitiers.

En 2003, 18 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français. La dernière inscription d'une nouvelle variété de noisetier date de 14 ans. Deux nouvelles variétés, proposées par l'interprofession française, ont été déposées en demande d'inscription en 2003. Dans les épreuves DHS autrefois réalisées par l'INRA et dans le futur par l'Espagne, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de deux années de production significative. À l'issue de cet examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée des arbres maintenus en collection de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer à l'obteneur un titre de protection (appelé COV), lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des plants (marcottes). Pendant l'hiver 2004-2005, près de 89 000 marcottes certifiées ont été vendues pour 8 variétés certifiées.

Pour en savoir plus

- Al Kai H., Salesses G. et Mouras A.**, 1984. Multiplication *in vitro* du noisetier (*Corylus avellana* L.). *Agronomie*, 4 (4), 399-402.
- Bassil N.V., Mok D.W.S., Mok M.C. et Rebhuhn B.J.**, 1992. Micropropagation of the hazelnut, *Corylus avellana*. *Acta Hortic.*, 300, 137-140.
- Bassil N.V. et Azarenko A.N.**, 2001. RAPD markers for self-incompatibility in *Corylus avellana*. *Acta Hortic.*, 556, 537-543.
- Coyné C.J., Mehlenbacher S.A. et Smith D.C.**, 1998. Sources of resistance to eastern filbert blight in hazelnut. *J. Am. Hortic. Sci.*, 123 (2), 253-257.
- Dosba F. et Lepinasse Y.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.
- Eurofruit**, 1993. La noisette française face au rouleau compresseur américain. *Eurofruit magazine Unicoque*, août, 74-75.
- Germain E.**, 1991. 'Paueter' : nouvelle variété d'industrie. *Fruits, Légumes*, 83, 18-19.
- Germain E. et Sarraquigne J.-P.**, 2004. *Le Noisetier*. Ed. Ctifl, Paris, 300 p.
- Lagerstedt H.B.**, 1980. 'Ennis' and 'Butler' Filberts. *Hortscience*, 15 (6), 833-835.
- Massado D.R., Piccirilo P., Santangelo I. et Giudice L.**, 2002. From biotechnology to new techniques for the rapid individualization of compatible pollen of hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Riv. Fruttic. Ortofloric.*, 64 (3), 95-98.
- Mc Cluskey R.L., Azarenko A.N., Mehlenbacher S.A. et Smith D.C.**, 2001. Commercial hazelnut cultivar and advanced selection evaluations at Oregon State University. *Acta Hortic.*, 556, 89-95.
- Mehlenbacher S.A.**, 1994. Genetic improvement of the hazelnut. *Acta Hortic.*, 351, 23-38.
- Mehlenbacher S.A.**, 1995. Classical and molecular approaches to breeding fruit and nut crops for disease resistance. *Hortscience*, 30 (3), 466-477.
- Mehlenbacher S.A., Miller A.N., Thompson M.M., Lagerstedt H.B. et Smith D.C.**, 1991. « Willamette » hazelnut. *Hortscience*, 26 (10), 1341-1342.
- Mehlenbacher S.A., Azarenko A.N., Smith D.C. et Mc Cluskey R.**, 2000. 'Lewis' hazelnut. *Hortscience*, 35 (2), 314-315.
- Mehlenbacher S.A., Azarenko A.N., Smith D.C. et Mc Cluskey R.**, 2001. 'Clark' hazelnut. *Hortscience*, 36 (5), 995-996.
- Mehlenbacher S.A.**, 1997. Revised dominance hierarchy for S-alleles in *Corylus avellana* L. *Theor. Appl. Genet.*, 94, 360-366.
- Miaja M.L., Vallania R., Me C., Akkak A., Nassi O. et Lepori G.**, 2001. Varietal characterization in hazelnut by RAPD markers. *Acta Hortic.*, 556, 247-250.
- Pomper K.W., Azarenko A.N., Bassil N., Davis J.W. et Mehlenbacher S.A.**, 1998. Identification of random amplify polymorphic DNA (RAPD) markers for self-incompatibility alleles in *Corylus avellana* L. *Theor. Appl. Genet.*, 97 (3), 479-487.
- Rovira M., Aleta N., Germain E. et Arus P.**, 1993. Inheritance and linkage relationships of ten isozyme genes in hazelnut. *Theor. Appl. Genet.*, 86 (2/3), 322-328.
- Rovira M. et Tous J.**, 2001. Performance of 17 hazelnut selections from four different breeding programs in Tarragona (Spain). *Acta Hortic.*, 556, 171-176.

- de Salvador F.R.**, 2001. Situation with Italian Hazelnut cultivars. *Riv. Fruttic. Ortofloric.*, 63 (10), 23-28.
- Sarraquigne J.-P. et Germain E.**, 1985. Noisetier : les variétés. *Fruits Légumes* (19), 11-15.
- Thompson M.M.**, 1979. Genetic of incompatibility in *Corylus avellana* L. *Theor. Appl. Genet.*, 54, 113-116.
- Valentini N. et Me G.**, 1999. New hazelnut selections for industrial use. *Riv. Fruttic. Ortofloric.*, 61 (11), 36-38.
- Valentini N., Me G., Vallania R. et Zeppa G.**, 2001. New Hazelnut selections for direct consumption. *Acta Hortic.*, 556, 103-106.
- Yao Q. et Mehlenbacher S.A.**, 2000. Heritability, variance components and correlation of morphological and phenological traits in hazelnut. *Plant Breed.*, 119 (5), 369-381.
- Yao Q. et Mehlenbacher S.A.**, 2001. Distribution of quantitative traits in hazelnut progenies. *Acta Hortic.*, 556, 143-161.

Le noyer

Juglans regia L. ($2n = 2x = 32$)
(Juglandacées)

Présentation de l'espèce

Le noyer *Juglans regia* L. est originaire des régions montagneuses de l'Asie, depuis l'ouest de la Chine et l'Himalaya jusqu'à l'Asie centrale, le Caucase et l'est de la Turquie. Les données palynologiques montrent que le noyer a disparu des Balkans et du sud-ouest de la Turquie lors de la dernière glaciation de Würm. Le pollen de noyer y réapparaît au milieu du deuxième millénaire av. J.-C., ce qui laisse penser que l'arbre a été réintroduit par l'homme à l'Âge du Bronze. Mais, il pourrait aussi avoir recolonisé l'Europe à partir de refuges glaciaires dans le sud de l'Italie et de la Grèce.

Quoi qu'il en soit, les Grecs semblent en avoir introduit des formes améliorées de Perse, et on doit essentiellement sa diffusion en Europe et en Afrique du Nord aux Romains. Avant le développement de l'empire colonial et l'importation massive d'huile d'arachide, la noix était une importante source d'huile alimentaire en France. Au XVI^e siècle, le noyer a été introduit en Amérique du Sud. Au XX^e siècle, la culture de cette plante s'est développée très rapidement en Californie.

Le noyer est une plante pérenne autofertile chez laquelle l'allogamie est cependant favorisée par une dichogamie marquée (c'est-à-dire que les floraisons mâle et femelle sont décalées dans le temps). Le pollen du noyer est très léger et la pollinisation est anémophile. Il n'est pas impossible qu'il puisse parcourir plusieurs dizaines de kilomètres. Cependant, pratiquement, il est admis qu'une distance de 500 mètres représente un obstacle important à l'interpollinisation entre deux arbres. D'autre part, toutes les espèces du genre *Juglans* L. sont interfertiles.

En France le noyer est multiplié végétativement par greffage, presque exclusivement sur *Juglans regia* L. Ce porte-greffe représente actuellement 85 % de la noyeraie française, le reste étant constitué à parts égales d'arbres de semis ou

greffés sur des espèces de noyer noir (*J. nigra* L.) et exceptionnellement de *J. major* (Torr.) Heller ou d'hybrides (*J. nigra* × *J. regia* et *J. major* × *J. regia*). Une noyeraie est implantée pour plusieurs dizaines d'années.

Le noyer est cultivé dans plus de 45 états. Sous l'égide de l'Union européenne et de la FAO, de nombreuses prospections ont été réalisées durant les 20 dernières années en Europe et en Asie centrale. Des conservatoires ont été mis en place et il est probable qu'il n'y a pas eu de perte sensible de biodiversité. Cependant, il faut signaler que les ressources génétiques sont actuellement mises en danger par une maladie de type bactérien qui se développe dans des conditions climatiques peu favorables. Des précautions particulières doivent donc être prises pour limiter sa propagation, tant au niveau de la diffusion des ressources génétiques que de la multiplication des plants. Les arbres contaminés présentent des chancres profonds sur le tronc et la charpente principale. L'agent pathogène responsable de ces problèmes est probablement une bactérie du genre *Brenneria* (*B. nigrifluens*) qui est malheureusement bien connue pour les dégâts qu'elle a entraînés sur les noyeraies californiennes. Une étude épidémiologique dans les régions françaises nucicoles (le Dauphiné et le Périgord) a montré une recrudescence de cette maladie.

Production et utilisation

Le produit récolté est principalement la noix qui est un fruit charnu, une drupe déhiscente contenant un noyau volumineux formé de deux valves lignifiées et soudées. Cette noix renferme une amande cérébriforme, comestible appelée cerneau.

La production mondiale de noix est de près de 1,5 million de tonnes (données FAO, 2004). La Chine (415 000 t), les États-Unis (295 000 t), l'Iran (150 000 t) et la Turquie (130 000 t) sont les plus grands producteurs. La production française atteint 27 000 tonnes. Aujourd'hui, le noyer est cultivé essentiellement pour la production de fruit (en coque, cerneau) et de bois. La noix se classe au deuxième rang de la production mondiale de fruits secs derrière l'amande et devant la noisette.

Histoire des variétés cultivées en France

Principales variétés

1784, '**Franquette**', variété traditionnelle, issue d'une sélection massale, appréciée pour la couleur très claire et la qualité du cerneau. Cette variété reste la plus cultivée en France.

'**Marbot**', variété traditionnelle du Périgord issue d'une sélection massale, appréciée pour le marché de la noix fraîche, pour sa précocité et le calibre de son fruit.

‘Grandjean’, variété traditionnelle du Périgord issue d’une sélection massale, produisant un fruit de petit calibre adapté pour le marché du cerneau.

‘Corne’, variété traditionnelle du Périgord issue d’une sélection massale, produisant un fruit de calibre moyen à coque épaisse, mais de très bonne qualité gustative.

‘Parisienne’, variété traditionnelle de la région de Grenoble (Isère), issue d’une sélection massale, rustique. Elle présente un intérêt, notamment sur la rive gauche de l’Isère où elle trouve des conditions pédoclimatiques favorables. Elle est destinée au marché de la noix fraîche et de la noix sèche.

‘Mayette’, variété traditionnelle de la région de Grenoble, issue d’une sélection massale, qui est intéressante pour le calibre et la qualité gustative de son fruit.

1909, **‘Hartley’**, première variété (issue d’un semis de hasard et sélectionnée aux États-Unis) à gros fruit.

1968, **‘Serr’** (université de Davis, États-Unis), variété issue d’un croisement entre ‘Payne’ et PI.15968 (sélection afghane) réalisé en 1958. Elle se caractérise par sa vigueur, sa productivité et sa capacité à fructifier sur les brindilles latérales. Sa floraison est très précoce. Le rendement en cerneau de son fruit est très élevé.

1979, **‘Chandler’** (université de Davis, États-Unis), variété regroupant une capacité à fructifier sur les brindilles latérales et une excellente qualité de cerneau. C’est la variété actuellement la plus plantée aux États-Unis. Elle est issue d’un croisement, réalisé en 1963 entre ‘Pedro’ et ‘UC56224’.

1981, **‘Pieral’** (Domaine de Lalanne, France), variété à fructification sur brindilles latérales, très productive, se distinguant par le calibre important de son fruit. ‘Pieral’, bien adaptée au marché de frais, est la seconde variété la plus plantée en France après ‘Franquette’. Cette variété est issue d’un semis de ‘Payne’. Cette variété est commercialisée sous la marque Lara®.

1995, **‘Fernor’** (INRA, France), première variété alliant fructification sur brindilles latérales, tardiveté de floraison et très bonne qualité du cerneau. Cette variété, issue d’un croisement réalisé en 1978 entre ‘Franquette’ et ‘Pieral’, a une mise à fruit rapide, échappe aux gelées de printemps et produit une noix de qualité équivalente à celle de ‘Franquette’.

1999, **‘Ferjean’** (INRA, France), variété à fructification sur brindilles latérales, très productive et de petit calibre correspondant aux besoins du marché du cerneau. Elle est issue d’un croisement, réalisé en 1982, entre ‘Grosvert’ et ‘Pieral’.

Variétés pollinisatrices

‘Ronde de Montignac’, variété ancienne originaire du Périgord, **‘Meylan-naise’**, variété ancienne originaire de l’Isère et **‘Fernette’** (1995, INRA, France), variété hybride.

La pollinisation étant anémophile, la plantation de variétés pollinisatrices est conseillée à raison de 4 à 6 arbres par hectare et de 2 variétés différentes.

Les AOC « noix françaises »

Les Appellations d'origine contrôlée (AOC) ont permis d'établir des cahiers des charges stricts, de mieux définir le produit notamment en choisissant des variétés bien typées, de fixer des normes précises de mise sur le marché et d'assurer une bonne traçabilité. Ces mesures ont conduit à une forte progression de la qualité de la noix et du cerneau mis sur le marché. Un autre bénéfice des AOC a été de mieux structurer la profession de la noix. Il existe actuellement deux AOC « noix françaises » :

- l'AOC « Noix de Grenoble » qui existe depuis 1938. La notion de variété est prise en compte puisque seules les variétés 'Franquette', 'Mayette' et 'Parisienne' sont autorisées, en mélange ;

- l'autre AOC « Noix et cerneau du Périgord » qui a fait l'objet d'un décret en 2002. Dans ce cas, les variétés autorisées sont 'Franquette', 'Marbot', 'Corne' et 'Grandjean'.

Seules des variétés anciennes sont donc actuellement utilisables dans les AOC « noix françaises ». Cela s'explique par le fait que l'AOC s'appuie sur la notion d'antériorité (de tradition). Mais, la situation n'est pas bloquée : rien ne s'oppose à l'intégration dans quelques années de nouvelles variétés dans les AOC, si elles montrent des qualités, notamment gustatives, au moins égales à celles des variétés anciennes actuellement retenues.

Porte-greffe

Le semis de noyer commun *J. regia* reste actuellement le plus employé pour la plupart des situations du fait de sa tolérance au virus de l'enroulement foliaire du cerisier (*Cherry leaf roll virus*, CLRV) et du niveau de vigueur relativement satisfaisant qu'il induit aux variétés à fructification sur brindilles latérales, très productives.

Remarque. La création variétale a permis de sélectionner en France un matériel original associant les caractéristiques des géniteurs utilisés dans des croisements réalisés entre des noyers d'origine française choisis pour leur tardiveté de floraison et la bonne qualité de leur noix et cerneaux et des noyers sélectionnés en Californie pour leur fructification sur brindilles latérales. Cependant, la diffusion des nouvelles variétés est jusqu'à présent limitée, car elles ne sont pas autorisées dans les AOC (cf. encadré ci-dessus).

Regard sur 50 ans de sélection

L'université de Davis (Californie, États-Unis) depuis 1946 et l'INRA de Bordeaux (Gironde) depuis 1977 sont les principales équipes à avoir lancé des programmes significatifs d'amélioration du noyer. La productivité, la rusticité et la qualité du cerneau sont les trois principaux caractères à avoir été améliorés.

Caractères importants améliorés

Fructification sur brindilles latérales. Les variétés classiques jusqu'alors ne fructifiaient qu'en position terminale sur rameaux d'un an. L'originalité des programmes d'amélioration du noyer est d'avoir introduit le caractère de fructification sur des brindilles latérales. Ce caractère est essentiel, car il est associé à une mise à fruit rapide et permet d'augmenter de façon très significative

(+ 50 %) la productivité par rapport aux variétés classiques. Ce caractère permet aussi de réduire très sensiblement les coûts de production.

Tardiveté de débourrement et de floraison. Ce critère est important, car il permet d'éviter les gelées printanières et de limiter les risques de bactériose du noyer (*Xanthomonas campestris* pv. *juglandis*).

Vigueur des porte-greffe. Des porte-greffe vigoureux ont été créés par croisements interspécifiques. Ces hybrides F₁ permettent d'avoir un bon équilibre vigueur / production avec les nouvelles variétés très productives à fructification sur brindilles latérales. Mais, ils sont hypersensibles au virus de l'enroulement foliaire du cerisier (*Cherry leafroll virus*, CLRV) et donc susceptibles d'induire une incompatibilité différée au point de greffe, si la variété vient à être contaminée par ce virus. Des rétrocroisements avec *Juglans regia*, effectués sur ces hybrides F₁ permettent d'obtenir des clones porte-greffe tout aussi vigoureux, mais tolérants au CLRV. Par ailleurs, des porte-greffe de noyer ont été sélectionnés par le Ctifl par semis dans la descendance de *Juglans regia*, puis multipliés *in vitro* pour l'obtention d'une vigueur supérieure à celle des semis classiques et d'une tolérance au CLRV.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	OUI Des porte-greffe de noyer ont été réalisés par hybridation interspécifique entre le noyer commun <i>J. regia</i> et <i>J. major</i> ou <i>J. nigra</i> en France (INRA) et <i>J. hindsii</i> aux États-Unis (université de Davis). Les hybrides interspécifiques obtenus sont ensuite rétrocroisés avec <i>J. regia</i> . Ces derniers porte-greffe sont très intéressants en raison de leur effet inducteur de vigueur et leur tolérance au virus de l'enroulement foliaire amené par <i>J. regia</i> (pas d'incompatibilité différée au point de greffe en cas de contamination de la variété greffée). Ils sont en cours d'expérimentation et certains hybrides interspécifiques de première génération sont déjà utilisés comme porte-greffe.
EN COURS	
Des croisements interspécifiques entre le noyer commun <i>J. regia</i> et les espèces de noyer noir (<i>J. nigra</i> , <i>J. major</i> en France et <i>J. hindsii</i> Jeps. ex R.E. Sm. aux États-Unis) ont été réalisés de manière à introduire le caractère monogénique dominant de résistance par hypersensibilité au virus de l'enroulement foliaire du cerisier présent chez les noyers noirs. Des rétrocroisements successifs avec <i>J. regia</i> ont ensuite été effectués pour améliorer la qualité du fruit tout en veillant à ne pas perdre à chaque nouvelle génération le caractère de résistance au virus de l'enroulement foliaire du cerisier (impossibilité de contamination de ces arbres par du pollen d'arbres virosés). Aucune variété de ce type n'a encore été diffusée tant en France qu'aux États-Unis.	

suite...

... suite

Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	1^{res} plantes transformées. La transgénèse est possible chez le noyer depuis 1988. Essais au champ et commercialisation. En 1990, des projets californiens de recherche visant à introduire le gène codant l'endotoxine de <i>Bacillus thuringiensis</i> ou un gène codant la protéine capsidiale du virus de l'enroulement foliaire du cerisier ont été lancés de manière à lutter contre ces bio-agresseurs. Plus d'une douzaine d'essais de noyer transgénique ont été autorisés aux États-Unis avant 2000.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Le greffage permet de multiplier les nouvelles variétés obtenues. La culture <i>in vitro</i> a été utilisée, par exemple, pour la multiplication de nouveaux porte-greffe au cours de la présélection ([<i>J. nigra</i> × <i>J. regia</i>] × <i>J. regia</i> et [<i>J. major</i> × <i>J. regia</i>] × <i>J. regia</i>). Certaines variétés allemandes (par exemple : 'Geisenheim 26', 'Geisenheim 139') et hongroises (par exemple, 'Esterhasy II'), caractérisées par leur régularité de rendement, sont apomictiques. Elles donnent donc par semis des individus identiques à elles-mêmes.
	EN COURS La notion de culture du noyer à partir de variétés auto-racinées (c'est-à-dire cultivées sur leurs propres racines), multipliées <i>in vitro</i>, est récente, puisque datant d'une quinzaine d'années aux États-Unis et d'une dizaine d'années en France. Les premiers résultats de ces expérimentations sont intéressants car ces plants, malgré un léger retard de la mise à fruit, présentent une bonne vigueur. Cette méthode évitant l'étape onéreuse du greffage, permet d'abaisser de manière conséquente le coût d'achat des plants.
Sélection sanitaire	EN COURS Les techniques de microgreffage, thérapie et culture de méristèmes ne sont pas utilisées. Par contre, un test ELISA a été mis au point afin de pouvoir détecter le virus de l'enroulement foliaire du cerisier, qui se transmet par pollen et par greffage, notamment dans les ressources génétiques et dans les géniteurs utilisés pour les programmes de création variétale par hybridation.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Des cartes génétiques comprenant plus d'une centaine de marqueurs ont été établies. Les marqueurs sont des outils pour étudier les relations phylogénétiques entre les différents génotypes de noyer. Des marqueurs moléculaires sont en cours d'identification pour trier les individus hypersensibles ou tolérants au virus de l'enroulement foliaire du cerisier.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Des croisements intra- ou interspécifiques sont effectués, suivis ou non de rétrocroisements. Les descendants obtenus sont étudiés en parcelles de sélection, ce qui permet une présélection des génotypes présentant les caractères recherchés. Ces présélections sont greffées et placées en expérimentations multilocales. Ceci permet de faire la sélection finale. Les génotypes sélectionnés sont ensuite multipliés par greffage ou par culture <i>in vitro</i> .
Types variétaux	Les variétés actuellement cultivées sont : – soit issues d'un semis de hasard ; – soit un clone d'hybrides intra- ou interspécifiques .

Perspectives d'amélioration

Depuis 2001, les programmes d'hybridations menés par l'INRA ont diminué d'importance. Au niveau de la création variétale, seuls des croisements entre variétés françaises et variétés originaires d'Asie centrale et du Bassin méditerranéen sont en cours d'observation. Aucun nouveau croisement n'est prévu. Cependant, 2 ou 3 nouvelles variétés, issues de programmes antérieurs, devraient être diffusées dans les prochaines années. Le programme de création de variétés résistantes au CLRV par hypersensibilité risque d'être abandonné et ceux concernant la résistance à la bactériose du fruit ou au chancre vertical suintant de l'écorce nécessitent un financement important, non disponible actuellement. Le programme de porte-greffe très vigoureux et tolérants à ce même virus devrait aboutir dans les dix prochaines années à la diffusion en France de clones répondant à ces deux critères. Cependant, aucun nouveau croisement n'est prévu.

Ainsi, seule l'université de Davis en Californie continue de mener un programme significatif de création variétale avec la perspective de mettre sur le marché, dans un avenir relativement proche :

- des variétés résistantes au CLRV du fait d'une hypersensibilité à ce virus, obtenues à partir de programmes utilisant les techniques d'hybridation classique et aussi de transgénèse ;
- des variétés résistantes au carpocapse obtenues par transgénèse ;
- des porte-greffe vigoureux et tolérants au CLRV, donc n'induisant pas de phénomène d'incompatibilité au point de greffe, lorsque la variété greffée est virosée.

Caractères à améliorer

Tolérance aux maladies. Le principal objectif consiste à produire des variétés tolérantes à la bactériose du noyer causée par *Xanthomonas campestris* pv. *juglandis*. Cette maladie est susceptible d'occasionner des pertes de production de près de 80 %. Il serait aussi intéressant de créer des variétés tolérantes au chancre vertical suintant de l'écorce causé probablement par une autre bactérie,

Brenneria nigrifluens. L'obtention de variétés résistantes par hypersensibilité au virus de l'enroulement foliaire du cerisier (CLRV), et donc ne pouvant héberger ce virus est enfin en cours à partir de croisements interspécifiques suivis de plusieurs rétrocroisements.

Qualité nutritionnelle. La teneur assez élevée en fibres, la richesse en sels minéraux (magnésium, potassium et phosphore) et la richesse en acides gras insaturés de la noix lui confèrent des propriétés bénéfiques pour le système cardiovasculaire. Ce fruit contient des polyphénols (molécules à action antioxydante) qui participent aussi à la bonne santé cardiovasculaire en prévenant l'artériosclérose. La noix est aussi intéressante pour sa teneur en vitamines E et B. Il a été montré que sa consommation avait une influence favorable sur la tension artérielle et la cholestérolémie. La noix est susceptible d'être infectée par *Aspergillus flavus*, un champignon qui produit des substances hautement cancérigènes, les aflatoxines. Ce problème peut limiter le potentiel de vente et d'exportation de la noix.

Techniques à développer

Marquage moléculaire. Cette technique devrait prochainement être utilisée pour sélectionner, dans un premier temps, des variétés résistantes au virus de l'enroulement foliaire du cerisier.

Inscription et protection des variétés en France

1973, ouverture, par arrêté ministériel, de la liste noyer dans le catalogue officiel arbres fruitiers.

En 2003, 26 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français. Dans les études DHS réalisées par l'INRA pour le compte du CTPS, du CPOV ou de l'OCVV, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 3 années de production significative. À l'issue de cet examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée des arbres maintenus en collection de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des scions (ou plants greffés). En 2004, seize variétés étaient concernées et ces dix dernières années, 150 000 scions certifiés ont été produits en moyenne par an.

Pour en savoir plus

- Aleta N., Rovira M., Ninot A. et Arus P.**, 1993. Inheritance of four isozymes in walnut. *Acta Hortic.*, 311, 62-67.
- Aleta N., Ninot A., Moragrega C., Lioriente I. et Montesinos E.**, 2001. Bligh sensitivity of spanish selections of *J.regia*. *Acta Hortic.*, 544, 353-362.
- Bourrain L. et Navatel J.-C.**, 1994. Micropropagation du noyer *Juglans regia* L. 1-Production de plants *in vitro*. *Infos-Ctifl*, 98, 40-46.
- Bourrain L. et Navatel J.-C.**, 1995. Micropropagation du noyer *Juglans regia* L. 2-Acclimatation en serre et élevage du plant en pépinière. *Infos-Ctifl*, 112, 28-33.
- Dandekar A.M., McGranahan G.H., Vail P.V., Uratsu S.L., Leslie C.A. et Tebbets J.S.**, 1998. High levels of expression of full-length *cryIAC* gene from *Bacillus thuringiensis* in transgenic somatic walnut embryos. *Plant Sci.*, 131 (2), 181-193.
- Dosba F. et Lepinasse Y.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.
- Dosba F., Lansac M., Germain E., Mazy K. et Rovira M.**, 1990. Le virus du *Cherry leaf roll* (CLRV) : relation avec le dépérissement du noyer et comportement de différentes espèces ou hybrides interspécifiques de *Juglans*. *Fruits*, 45 (2), 171-175.
- El Euch C., Jay-Allemand C., Pastuglia M., Doumas P., Charpentier J.-P., Capelli P. et Jouanin L.**, 1998. Expression of antisense chalcone synthase RNA in transgenic hybrid walnut micro-cuttings. Effect on flavonoid content and rooting ability. *Plant Mol. Biol.*, 38 (3), 467-479.
- Fjellstrom R. G., Parfitt D. E. et McGranahan G.H.**, 1994. Genetic relationships and characterization of Persian walnut (*Juglans regia* L.) cultivars using restriction fragment length polymorphisms (RFLPs). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 119 (4), 833-839.
- Germain E.**, 1989. Les porte-greffe du noyer, caractéristiques et limites d'utilisation. *Arbor. Fruit.*, 423, 20-26.
- Germain E.**, 1990. Inheritance of late leafing and lateral fruitfulness in walnut (*Juglans regia* L.), phenotypic correlations among some traits of the tree. *Acta Hortic.*, 284, 125-134.
- Germain E.**, 1992. Le noyer. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 620-632.
- Germain E.**, 1997. Genetic improvement of the Persian walnut (*Juglans regia* L.). *Acta Hortic.*, 442, 21-31.
- Germain E., Aleta N., Ninot A., Rouskas D., Zakhintinos G., Gomes Pereira J., Monastra F. et Limongelli F.**, 1997. Prospections réalisées dans les populations de semis de noyer d'Espagne, de Grèce, d'Italie et du Portugal : caractérisation des populations et description en collections d'études des présélections issues de ces prospections. Dans : *Amélioration d'espèces de fruits à coque : noyer, amandier, pistachier*. *Options Méditerran.*, série B, 16, 9-40.
- Germain E., Charlot G. et Prunet J.P.**, 1996. Fernor et Fernet : deux nouvelles variétés, un atout pour la nuciculture française de l'an 2000. *Infos-Ctifl*, 124, 27-29.
- Germain E., Delort F. et Kanivetz V.**, 1997. Precocious maturing walnut populations originating from Central Asia : their behaviour in France. *Acta Hortic.*, 442, 83-89.
- Germain E., Dosba F. et Fos E.**, 1994. Création de nouveaux porte-greffe de noyer « vigorisants » et tolérants au virus du *Cherry leaf roll*. *10^e Colloque Recherches Fruitières*, Angers, 277-284.
- Germain E., Hanquier I. et Monet R.**, 1993. Identification of eight *Juglans* spp. and their interspecific hybrids by isoenzymatic electrophoresis. *Acta Hortic.*, 311, 73-85.
- Germain E., Léglise P. et Bayol M.**, 1985. Création, par hybridation, de variétés de noyer (*Juglans regia* L.) associant floraison tardive, mise à fruit rapide et productivité élevée : premiers résultats. *Colloque Rech. Fruitières*, 154-157.
- Germain E., Prunet J.-P. et Garcin A.**, 1999. *Le noyer*. Monographie. Ctifl éd., Paris, 279 p.

- Godeanu I., Botu M., Baci A. et Achim G.**, 1997. Valuable walnut hybrids and selections for intensive growth in Romania. *Acta Hortic.*, 442, 95-100.
- Hasey J.K., Westerdhal B.B., Micke W.C., Ramos D.E. et Yeager J.T.**, 2001. Yield performance of own-rooted 'Chandler' walnut versus 'Chandler' walnut on Paradox rootstock. *Acta Hortic.*, 544, 489-493.
- Jay-Allemand C., Capelli P. et Cornu D.**, 1992. Root development of in vitro hybrids walnut microcuttings in a vermiculite-containing gelrite medium. *Sci. Hortic.*, 51 (3-4), 335-342.
- Jay-Allemand C., Peng S., Capelli P. et Cornu D.**, 1993. Micropropagation of hybrid walnut trees : some factors involved in rooting. *Acta Hortic.*, 311, 117-124.
- Korac M., Cerovic S., Golosin B., Ognjanov V. et Miletic R.**, 1993. Prospective Yugoslav walnut selections with lateral fruit buds. *Acta Hortic.*, 311, 41-45.
- Lansari A., El Hassani A., Nabil D. et Germain E.**, 2001. Preliminary results on walnut germplasm evaluation in Morocco. *Acta Hortic.*, 544, 27-35.
- Leslie C.A. et McGranahan G.H.**, 1992. Micropropagation of Persian walnut (*Juglans regia* L.). *Biotechnol. Agric. For.*, 18, 136-150.
- Leslie C.A., McGranahan G.H., Mendum M.L., Uratsu S.L. et Dandekar A.M.**, 1997. Genetic engineering of walnut (*Juglans regia* L.). *Acta Hortic.*, 442, 33-41.
- Mahoney N., Molyneux R.J. et Campbell B.C.**, 2000. Regulation of aflatoxin production by naphthoquinones of walnut (*Juglans regia*). *J. Agric. Food Chem.*, 48 (9), 4418-4421.
- Marques Silva D.J. et Dias J.S.D.**, 1997. In vitro shoot culture on *Juglans regia* L. : repeated subculturing on juvenile and adult material. *Acta Hortic.*, 442, 251-256.
- Mc Granahan G.H., Leslie C.A. Uratsu S.L. et Dandekar A.M.**, 1990. Improved efficiency of the walnut somatic embryo gene transfer system. *Plant Cell Rep.*, 8 (9), 512-516.
- Mc Granahan G.H., Leslie C.A. et Woeste K.E.**, 1997. Backcross breeding walnuts for resistance to the cherry leaf roll virus. *Acta Hortic.*, 442, 121-127.
- Mc Granahan G.H., Leslie C.A., Uratsu S.L., Martin L.A. et Dandekar A.M.**, 1988. *Agrobacterium*-mediated transformation of walnut somatic embryos and regeneration of transgenic plants. *Bio Technol.*, 6 (7), 800-804.
- Meynier V.**, 1985. Mise en culture *in vitro* de méristèmes de noyers hybrides. *C. R. Acad. Sci. Ser. III Sci. Vie*, 301 (5), 261-264.
- Morone C., Janse J.D. et Scortichini M.**, 1998. Bark canker of Persian walnut (*Juglans regia*) trees incited by *Erwinia nigrifluens* in Italy. *J. Phytopathol.*, 146 (11-12), 637-639.
- Nicese F.P., Hormaza J.I. et McGranahan G.H.**, 1998. Molecular characterization and genetic relatedness among walnut (*Juglans regia* L.) genotypes based on RAPD markers. *Euphytica*, 101 (2), 199-206.
- Potter D., Gao F.Y., Baggett S., McKenna J.R. et McGranahan G.H.**, 2002. Defining the sources of Paradox : DNA sequence markers for North American walnut (*Juglans* L.) species and hybrids. *Sci. Hortic.*, 94 (1/2), 157-170.
- Radix P.**, 1994. *Étude des facteurs influençant la formation des nécroses sur fruits chez le noyer* (*Juglans regia*). *Implication des composés phénoliques*. Thèse univ. Joseph Fourier, Grenoble I, 185 p.
- Ramos D.**, 1998. Walnut production manual. Publ. 3373. Univ. of California, Davis, 320 p.
- Sen S.M., Balta F., Koyuncu M.A., Koyuncu F., Yarylgac T. et Kaznkaya A.**, 2001. Lateral fruitfulness on Turkish standard walnut cultivars and promising selections (*Juglans regia* L.). *Acta Hortic.*, 544, 41-45.
- Solar A., Smole J. et Stampar F.**, 1993. Identification of walnut cultivars by pollen isoenzymes. *Acta Hortic.*, 311, 95-100.
- Sütyemez M., Kaska N. et Ati S.**, 2001. Multiple fruited walnuts in Kahramanmaraş and Bolu, Turkey. *Acta Hortic.*, 544, 37-40.

- Scentivanyi P.**, 1990. Breeding early fruiting, high producing walnut cultivars leafing after late spring frosts. *Acta Hortic.*, 284, 175-182.
- Tang H.R., Ren Z.L., Wallbraun M., Reustle G. et Krczal G.**, 2001. Regeneration of transgenic plants from walnut somatic embryos mediated with *Agrobacterium tumefaciens*. *Acta Hortic.*, 544, 201-205.
- Sze-Tao K.W.C. et Sathe S.K.**, 2000. Walnuts (*Juglans regia* L.) : proximate composition, protein solubility, protein amino acid composition and protein in vitro digestibility. *J. Sci. Food Agric.*, 80 (9), 1393-14001.
- Woest K., Mc Granahan G.H. et Bernatzky R.**, 1996. The identification and characterization of a genetic marker linked to hypersensitivity to the *Cherry leaf roll virus* in walnut. *Mol. Breed.*, 2, 261-266.
- Woeste K., Mc Granahan G.H. et Bernatzky R.**, 1996. Randomly amplified polymorphic DNA loci from a walnut backcross [*Juglans hindsii* × *J. regia*] × *J. regia*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 121 (3), 358-361.
- Woest K., Mc Granahan G. H. et Bernatzky R.**, 1998. Low correlation between genomic and morphological introgression estimates in a walnut backcross. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 123 (2), 258-263.
- Xi S. K.**, 1990. An evaluation of 36 promising clones of Xinjiang precocious walnut in China. *Acta Hortic.*, 284, 191-193.
- Yarilgac T., Koyuncu F., Koyuncu M.A., Kazankaya A. et Sen S. M.**, 2001. Some promising walnut selections (*Juglans regia* L.). *Acta Hortic.*, 544, 93-96.

L'oignon

Allium cepa L. Groupe *Cepa* ($2n = 2x = 16$)
(Alliacées)

Présentation du Groupe *Cepa*

L'oignon (*Allium cepa* L. Groupe *Cepa*) est probablement originaire d'Asie centrale (entre la Mongolie et le Turkménistan). L'oignon paraît avoir migré depuis cette zone vers l'ouest et la Méditerranée orientale environ 2300 av. J.-C., et vers l'est et l'Inde du Nord. Mais, l'oignon ne s'est guère répandu avant l'époque moderne dans l'est de l'Asie, où la ciboule (*Allium fistulosum* L.) occupait largement sa niche culinaire. L'introduction en Égypte est attestée, à cette époque, par des représentations sur des bas-reliefs. L'oignon était un produit de grande consommation chez les Romains et Pline l'Ancien, au 1^{er} siècle, en décrit 10 variétés. L'oignon a, sans doute, été introduit en Europe centrale et du Nord par les Romains, mais il ne s'y est généralisé qu'au Moyen Âge. À cette époque, en France, l'oignon était sans doute un des légumes les plus répandus et à la Renaissance, toutes les formes actuelles étaient décrites par R.J. Camerarius, P.A. Matthioli, etc. C'est cette tradition de culture très ancienne qui est à l'origine d'innombrables variétés différant entre elles par la dimension, la forme et la couleur du bulbe. Un ancêtre d'*Allium cepa* survit toujours à l'état sauvage (sous le nom d'*A. vavilovii* Popov & Vved.) des deux côtés de la chaîne de montagnes du Kopet-Dag entre l'Iran et le Turkménistan.

L'oignon est une plante allogame entomophile, bisannuelle et multipliée par semences. L'oignon ne se croise pas avec les espèces indigènes françaises d'*Allium*. L'échalote (rose de Jersey), qui se multiplie végétativement le plus souvent, appartient à la même espèce que l'oignon, mais constitue un autre groupe : le Groupe *Aggregatum*.

L'oignon est cultivé depuis des temps immémoriaux (sa culture est citée en Mésopotamie dès l'époque sumérienne) et sous toutes les latitudes. Ceci est le résultat d'une adaptation des variétés populations locales aux conditions diverses du milieu : longueur du jour, température, etc. Cette espèce présente

une très grande variabilité génétique. Plusieurs banques de gènes ont été créées, sous l'impulsion de l'IPGRI, aux États-Unis, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas, en Israël (oignons de jours courts), en Hongrie, au Japon et en Tchéquie.

Production et utilisation

Le produit récolté à maturité est un bulbe, c'est-à-dire une plante entière dont la base des feuilles s'enfle en écailles épaisses et charnues (réserve d'eau et de glucides). Ce bulbe a le plus souvent un goût prononcé, qui le fait utiliser comme condiment. Par contre, les oignons doux sont consommés comme légume, souvent crus, dans les pays méditerranéens. Les Méditerranéens apprécient aussi les oignons frais (ou verts), dont on consomme à la fois le bulbe immature et les feuilles.

La production mondiale est de 55 millions de tonnes d'oignon sec et 4,4 millions de tonnes d'oignon et d'échalote frais (données FAO, 2004). La production mondiale est en hausse, en particulier en zones intertropicales. En France, les productions sont plus modestes : environ 446 000 tonnes d'oignon sec et 50 000 tonnes d'oignon frais. L'oignon est utilisé essentiellement pour l'alimentation humaine et il est consommé frais, sec ou transformé. Entre 5 et 10 % de la production nationale sont destinés à la transformation pour diverses utilisations : déshydratation, surgélation, salaison et fabrication de plats cuisinés, appertisation et conservation dans le vinaigre.

Histoire des variétés cultivées en France

Il existe une très grande diversité de types variétaux, classés selon :

- leur précocité (longueur du jour minimale nécessaire à la formation du bulbe ou bulbification). On distingue les oignons dits de jours courts, si la bulbification a lieu au printemps et les oignons dits de jours longs, si la bulbification a lieu en été ;
- la couleur de la tunique du bulbe : on distingue les oignons blancs, les oignons jaunes, les oignons roses, les oignons rouges et tous les intermédiaires ;
- la forme du bulbe, qui peut être aplatie, globuleuse, oblongue ou fusiforme ;
- leur destination : pour la vente en frais, soit dès la récolte en vert ou en sec, soit après conservation (oignon de garde) ; pour le traitement industriel (épluchage, déshydratation) ou pour la production de petits bulbes immatures (appelés « grelots » ou « bulbilles ») de semences ;
- ou leur mode de culture : on distingue les variétés de semis direct pour la grande culture mécanisée et celles pour le repiquage de plants (bulbilles) pour les jardiniers amateurs ou l'industrie de la transformation (bulbes plus riches en matière sèche).

Variétés anciennes

1752, de Combles cite neuf « espèces » d'oignon, dont le **'Pâle'**, « couleur paille, tirant sur le citron ou rouge pâle » et le **'Rouge rond'**, « le plus généralement cultivé en Europe parce qu'il est le plus gros et se conserve plus longtemps ».

Fin du XVIII^e siècle, **'Paille des Vertus'**, variété population d'oignon jaune, sélectionnée par les maraîchers de la plaine des Vertus près de Paris, pour semis de printemps. Cette variété, assez précoce, productive, à gros bulbe plat et de bonne conservation et à écailles jaunes de bonne tenue, a été longtemps la plus cultivée dans la ceinture maraîchère de Paris. Elle provient, sans doute, de l'ancien 'Oignon Jaune pâle' cité par de Combles en 1752.

1856, **'De Danvers'**, variété population d'oignon jaune introduite des États-Unis en France par les établissements Vilmorin. Elle est présente dans la généalogie d'un grand nombre de variétés actuelles de type *Rijnsburger*, c'est-à-dire, adaptées aux jours longs, tardives, à bulbe de forme globuleuse et d'une capacité de conservation très longue et pour semis de printemps.

Variétés populations d'oignon jaune d'Espagne et du sud-ouest de la France, formant un « continuum » depuis très longtemps sans doute. Parmi elles : **'Valencia temprana'**, **'De Moissac'**, **'De Lectoure'**.

'De Mulhouse type Auxonne', variété population d'oignon jaune rond qui constitue un assez bon compromis entre une teneur suffisamment élevée en matière sèche et un bon rendement. Cette variété pour semis de printemps, encore cultivée dans la vallée de la Saône, est adaptée au marché de frais et de la déshydratation. Il existe une forme à bulbe plus plat : **'De Mulhouse type Sélestat'**.

À la fin du XVIII^e siècle, des variétés populations très précoces d'oignon blanc venant du sud de l'Italie sont introduites en France pour les semis d'automne : – **'Hâtif de Paris'**, **'Très hâtif de Vaugirard'**, très cultivées dans les régions situées au nord de la Loire, très résistantes aux hivers froids, mais sensibles à la montée à graines au printemps ;

– **'Très hâtif de la reine'** ou **'Extra-hâtif de Barletta'** (variété d'oignon à confire), variétés cultivées en zone méridionale qui ne supportent que les hivers doux ;

– **'Nocera'**, **'De Pompei'**, variétés qui ont gardé leur nom d'origine.

Cette gamme de variétés d'oignon blanc a été complétée progressivement par des variétés populations : 'Premier', 'Extra-hâtif parisien', 'De Rébouillon', 'Gros de Lisbonne' afin d'élargir la gamme de précocité.

'Rosé de Roscoff', variété population d'oignon rose dont le bulbe à chair rose et douce se conserve très bien. Le caractère de stérilité mâle se rencontre fréquemment dans cette population. Certains paysans bretons (surnommés les Johnnies) partaient les vendre en Grande-Bretagne en faisant du porte à porte. Elle n'était pas inscrite au catalogue français, mais deux sélections ont été inscrites récemment : 'Jack' et 'Keravel' (1999, Domaine public, France).

‘Rouge pâle de Niort’, variété population d’oignon rouge à bulbe aplati, bien adaptée au climat de l’ouest de la France. Elle est destinée à la production de bottes au stade vert et à la production d’oignon de garde. Elle est cultivée dans l’ouest de la France, juste au sud de la Loire.

‘Rouge d’Italie’ ou **‘Italian red’**, population italienne d’oignon rouge clair assez précoce dans laquelle fut trouvée, aux États-Unis, en 1924, la première stérilité mâle de type nucléo-cytoplasmique (« système S »). Cette variété est très appréciée dans le Midi en frais et en oignon de garde. Elle se caractérise également par la production de bulbilles sur l’inflorescence.

‘De Brunswick’, variété population d’oignon rouge de forme globuleuse aplatie et à tunique violacée, pour semis de printemps. C’est un oignon de garde de très bonne conservation, cultivé dans le nord de la France.

‘De Simiane’, variété population d’oignon rouge à bulbe allongé ayant une très faible aptitude à la conservation, pour semis d’automne. Cette variété précoce ancienne est encore une référence dans le sud de la France, où elle demeure cultivée. L’oignon est consommé en frais, dès la maturité, en raison de sa mauvaise aptitude à la conservation.

‘De Lézignan’, variété population pour semis d’automne ou de printemps, d’oignon rose récolté en été et consommé en frais. Le bulbe est plutôt plat et contient plusieurs points végétatifs. Les bulbes non utilisés sont plantés en automne. Chaque point végétatif donne au printemps un bulbe un peu renflé qui est consommé avec ses feuilles (avant la montée à graines). C’est la « cébette » méridionale qui est appréciée comme condiment en accompagnement de salades. Elle est cultivée dans la région située au nord de Béziers (Hérault).

‘Espagnol’ (synonyme **‘Valencia tardia’**), variété population tardive adaptée aux zones méditerranéennes, pour semis de printemps. Le bulbe, gros et rond, à écailles jaune brun montre une bonne tolérance au thrips. Cette variété est très cultivée. Il existe deux populations de même type : l’une ‘Reccas’ à écailles encore plus bronzées, l’autre ‘Bronzé d’Amposta’ à chair rosée.

‘Rijnsburger’, variété population d’oignon jaune de forme globuleuse sphérique ayant une aptitude à la bulbification tardive et se conservant bien. D’origine néerlandaise, c’est une variété de jours longs, pour semis de printemps dans le nord de l’Europe et de la France. Elle est à l’origine de nombreuses variétés hybrides actuelles. C’est un exemple de « variété parapluie » (cf. définition p. 492) : sept groupes de cette grande population figurent actuellement dans le catalogue européen. Ils diffèrent par leur précocité.

Variétés récentes

1943, **‘California hybrid red I’** (université de Californie, États-Unis), première variété hybride nord-américaine réalisée grâce à la stérilité mâle de type nucléo-cytoplasmique S. Le parent femelle de cet hybride était multiplié végétative-

ment par bulbilles d'inflorescence. Cette variété n'a jamais été cultivée en France de façon significative.

1947, '**Calred**' (université de Californie, États-Unis), autre variété hybride nord-américaine réalisée avec la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « S ». Les deux parents sont multipliés par graines. Les deux lignées sœurs (ou populations homogénéisées), l'une mâle stérile, l'autre mainteneuse (c'est-à-dire mâle fertile et restauratrice de la fertilité) isogénique, sont utilisées pour produire les graines du parent femelle de l'hybride. De même que la précédente, cette variété n'a jamais été cultivée en France de façon significative.

1965, '**Spartan banner**' (université du Michigan, États-Unis), variété hybride tardive dans le type *Downing Yellow Globe* des États-Unis, c'est-à-dire à gros bulbe rond à écailles cuivrées. Elle a sans doute été assez cultivée aux États-Unis, mais peu ou pas cultivée en France. Le bulbe est globuleux et à écaille brune. La variété est assez sensible à la montaison en semis de printemps en Europe du Nord. De nombreuses variétés nord-américaines de ce type très cultivé aux États-Unis, ont été introduites en Europe, mais sans succès en raison de leur sensibilité à la montaison.

1976, '**Hygro**' et '**Hyduro**' (Bejo, Pays-Bas), premières variétés hybrides cultivées à grande échelle en Europe. Ce sont des hybrides du type *Rijnsburger* caractérisés par une aptitude à la bulbification tardive, pour semis de printemps au nord de l'Europe. Le bulbe est rond, légèrement aplati et à écailles verdâtres et adhérentes.

1977, '**Mayon**' (Sluis and Groot, Pays-Bas), variété fixée d'oignon jaune de jours courts d'origine japonaise se distinguant par sa résistance au froid, son aptitude à la bulbification précoce et la faible conservation de son bulbe. Le bulbe est rond, légèrement aplati et à écailles jaune clair de faible adhérence. La culture de ce type de variétés, dit « japonais » (mais souvent d'origine nord-américaine) permet d'alimenter le marché de frais entre juin et août et ainsi de réduire les importations pendant cette période. Beaucoup développée en France pendant une dizaine d'années pour la culture industrielle d'oignon de jours courts, elle est, depuis, en très nette régression.

1978, '**Jaune des Cévennes**' (Gautier, France), variété population d'oignon jaune avec un comportement intermédiaire vis-à-vis de la longueur du jour critique pour la bulbification. elle est adaptée aux latitudes méditerranéennes. Le bulbe, de forme aplatie, a une saveur douce, sa tunique est jaune clair et sa conservation est faible à moyenne. Des maintenances (*cf.* définition p. 196) à bulbe plus rond ont été inscrites : 'Toli' (Domaine public, France) en 1999 et 'Cenol' en 2000 (Domaine public, France).

1987, '**Elody**' (Clause, France), variété fixée d'oignon blanc, pour semis d'automne, qui a la particularité d'avoir une bonne aptitude à la conservation. Elle est, pour cette raison, utilisée non seulement en vert, mais aussi en oignon de garde, particulièrement en Italie.

1987, '**Lagos**' (Vilmorin, France), variété hybride d'oignon jaune, de type *Rijnsburger*, plus précoce, mais à écaille claire moyennement adhérente. De maturité tardive, le bulbe a une bonne aptitude à la conservation. C'est une variété bien adaptée à la zone Nord de la France, en semis de printemps.

1989, '**Printon**' (Griffaton, France), variété déclarée hybride d'oignon blanc, d'origine nord-américaine, riche en matière sèche et destinée à la déshydratation. Elle est adaptée au semis de printemps dans le nord de l'Europe.

1989, '**Staro**' (Caillard, France), variété hybride d'oignon blanc, pour semis de printemps. Sa forte teneur en matière sèche est à l'origine de son utilisation industrielle.

1996, '**Cuisse de poulet du Poitou**' ou '**Zebrune**', variété d'échalion précoce dont le bulbe est de forme allongé, à écaille jaune brun et à chair rose. La section espèces potagères du CTPS lors de sa réunion du 26/01/1996 a pris la décision de diviser le catalogue oignon en deux sous-rubriques : oignon et échalion. S'agissant de la même espèce, elle n'a pas défini de façon stricte la frontière entre les deux rubriques, mais les caractères retenus pour caractériser l'échalion et l'identifier clairement par rapport à l'échalote (rose de Jersey) sont les suivants : bulbe nettement allongé (le rapport longueur/largeur est de l'ordre de 2,5), coloration des écailles externes cuivrée, coloration de la chair anthocyanée, taux de matière sèche élevé (de l'ordre de 12-13 %) et bonne conservation du bulbe.

2001, '**Rio Verde**' (Rio Colorado Seeds, États-Unis), variété hybride d'oignon blanc de type *South Port White Globe*. Elle présente un comportement intermédiaire vis-à-vis de la longueur du jour.

Remarque. Il est clair qu'un certain nombre de variétés populations, cultivées autrefois en France, ont aujourd'hui presque disparu ou sont en danger ('Rouge de Huy', 'Jaune de Mazé', 'De Mazères', ...). Toutefois, un grand nombre de variétés traditionnelles méditerranéennes (françaises, italiennes et espagnoles) et tropicales (oignons de jours courts des DOM-TOM et d'Afrique comme 'Violet de Galmi') sont encore proposées dans les catalogues de certains semenciers et cultivées localement en raison de leurs caractéristiques et de leur adaptation. Par ailleurs, l'origine très voisine de la plupart des géniteurs mâles stériles pour la constitution des hybrides a plutôt appauvri la diversité génétique.

Regard sur 50 ans de sélection

Les premiers hybrides ont été réalisés aux États-Unis au début des années 1940. En France, jusqu'à la fin des années 1970, la sélection s'est contentée d'améliorer les populations existantes. Depuis, les établissements français et néerlandais de semences se sont orientés vers la création d'hybrides et aujourd'hui, les variétés d'oignon jaune cultivées dans le nord de la France de manière industrielle sont des hybrides pour plus de 80 % d'entre elles. Par

contre, au sud, ce sont des populations qui sont majoritairement cultivées, en particulier pour les oignons doux.

La sélection de l'oignon est lente du fait que cette plante est bisannuelle, allogame, délicate à castrer manuellement, et qu'elle présente une forte sensibilité à la consanguinité (il est difficile de faire plus de 3 autofécondations successives). Une très vaste gamme de ressources génétiques est disponible à des fins de sélection, mais l'acclimatation à des latitudes particulières (température et longueur du jour) demande beaucoup de temps en raison des rétrocroisements nécessaires. La physiologie des variétés spécifiques d'une zone pédoclimatique est, en effet, relativement stricte.

Les contraintes économiques ont imposé des modifications phytotechniques importantes (semis direct et mécanisation poussée) et l'oignon est devenu, dans le nord de l'Europe, une plante de grande culture, nécessitant des variétés performantes et homogènes. Les façons culturales sont déterminantes pour la quantité et la qualité de la récolte.

La progression des variétés hybrides a été lente car l'utilisation de la stérilité mâle est délicate, les lignées parentales sont parfois difficiles à maintenir et les avantages ne sont pas toujours évidents.

Caractères importants améliorés

Uniformité de la récolte (forme, couleur, calibre). Le progrès technique et l'homogénéité de la récolte (régularité de maturité et du calibre des bulbes), apportés par le passage aux variétés hybrides, ont permis une mécanisation totale de la culture.

Rendement. Le rendement de l'oignon dit de jours longs est de 40 à 70 t/ha tandis que celui de l'oignon dit de jours courts est de 30 à 50 t/ha. Le gain de rendement résulte non seulement de la sélection (forme globulaire et régularité du calibre du bulbe), mais aussi de l'évolution des techniques culturales (semis de précision avec semences calibrées et traitées, culture issue de semis de printemps, désherbage efficace, irrigation).

Aptitude à la conservation et aux manipulations. La sélection a porté sur la fermeté du bulbe, sur la solidité de ses tuniques (adhérence des écailles), sur la forme ronde du bulbe pour éviter la pourriture et sur l'aptitude à la conservation de celui-ci. Cette forme ronde est très importante pour la conservation car elle permet de réduire la respiration, donc la perte de matière sèche et d'éviter la pourriture du bulbe. D'autres facteurs (fertilisation mieux raisonnée, machines à récolter mieux adaptées, meilleur stockage et séchage des bulbes) ont également contribué à améliorer la conservation. La solidité de la tunique est, certes, un caractère que l'on peut améliorer par la sélection, mais il est globalement très lié aux pratiques culturales.

L'oignon : la première espèce cultivée où des variétés hybrides ont été produites à l'aide d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique

La stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « S » a été décrite en 1924, dans la population 'Italian red' ou 'Rouge d'Italie', mais il a fallu attendre 1943 pour que les premières variétés hybrides apparaissent aux États-Unis.

Les variétés hybrides d'oignon sont, soit des hybrides simples, soit des hybrides 3 voies. Il est important de noter que les hybrides simples ne sont pas de vrais hybrides F_1 car la forte sensibilité à la consanguinité ne permet pas de parvenir à des lignées pures comme parents.

Outre leur supériorité agronomique relative (vigueur d'implantation des plantules et rendement en général supérieur), le recours aux variétés hybrides a apporté une simplification des opérations culturales. En effet, les variétés hybrides ne contiennent pas de graines issues d'autofécondation qui donnent des plantes chétives. Il n'est donc plus nécessaire de les éliminer au stade du repiquage et le semis direct devient possible. L'augmentation de 15 % du rendement correspond à la disparition des 20-30 % de plantes chétives issues des graines autofécondées des variétés populations. L'oignon est devenu une plante de grande culture qui fait souvent partie de la rotation culturale aux côtés des céréales. Toutefois, l'utilisation ou non de variétés hybrides reste liée au contexte économique selon les pays : ainsi, les variétés hybrides d'oignon jaune pour la déshydratation ont peu de succès en France, le surcoût des graines n'étant pas ici compensé par le gain en rendement, tandis qu'aux États-Unis les variétés d'oignon blanc pour la déshydratation sont des hybrides. De nombreuses variétés populations sont encore cultivées dans le sud de l'Europe.

Résistance aux maladies. Des résistances à différentes maladies causées par des champignons ont été mises en évidence et introduites dans des variétés : mildiou de l'oignon (*Peronospora destructor*) ('Italian red'), *Fusarium oxysporum* ('Dorata di Parma'), *Phoma terrestris* ('Doux d'Espagne'), *Alternaria porri* ('Red creole').

Résistance à la montaison. La sélection pour ce caractère a permis de sécuriser les semis précoces en cultures de jours longs comme de jours courts.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	ESSAIS De nombreux croisements interspécifiques ont été tentés dans le but d'introduire des résistances au mildiou, au <i>Botrytis squamosa</i>, au charbon de l'oignon (<i>Urocystis cepulae</i>), au froid et au virus de la bigarrure de l'oignon (<i>Onion yellow dwarf virus</i>, OYDV). Le marquage moléculaire est maintenant utilisé pour appuyer cette stratégie.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Dans le cas de croisements interspécifiques entre <i>A. cepa</i> et <i>A. fistulosum</i>, l'hybride fertile 'Beltsville Bunching' est amphidiploïde ($2n = 2x = 32$, génome CCFF). La variété hybride triploïde 'Delta Giant' est cultivée à petite échelle aux États-Unis.
Transgénèse	ESSAIS La transgénèse est possible chez cette espèce (maîtrise de la technique par coculture d'<i>Agrobacterium tumefaciens</i> dans les années 1990). Les principaux gènes introduits sont des gènes rapporteurs (résistances aux herbicides, à la kanamycine), des gènes de résistance à la noctuelle <i>Spodoptera exigua</i> ou des gènes impliqués dans la voie métabolique des arômes soufrés. En 2000, un seul essai au champ avait été réalisé aux États-Unis et il n'y a pas de variété d'oignon transgénique commercialisée.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	ESSAIS Des protocoles de multiplication <i>in vitro</i> ont été réalisés dans les années 1990. Cette méthode est utilisée en sélection et en gestion des ressources génétiques dans le but de créer des variétés synthétiques de clones ou de maintenir des lignées mâles stériles.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	ESSAIS La culture de fleurs ou d'ovaires non fécondés (gynogenèse <i>in vitro</i>) donne de bons résultats. L'étape la plus délicate reste néanmoins le doublement du stock chromosomique. L'haplométhode est probablement utilisée par les sélectionneurs depuis 1989, mais on ne connaît pas de variétés commerciales directement issues de cette technique. Il est intéressant de remarquer que l'on puisse obtenir des plantes homozygotes chez cette espèce très sensible à la consanguinité.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	OUI
	Il existe plusieurs stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques : – « système S », trouvé en 1924, dans la plante 13-53 de la variété population italienne ‘Italian red’ ou ‘Rouge d’Italie’ (‘Calred’, ‘Hygro’) ; – « système T », trouvé en 1973, dans la variété population ‘Mulhouse type Sélestat’.
Recours à l’auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI
	Les marqueurs moléculaires sont utilisés pour structurer la diversité et pour le suivi des croisements interspécifiques.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	La sélection récurrente est utilisée pour améliorer les populations. La sélection généalogique permet la création de lignées qui sont utilisées pour faire des hybrides.
Types variétaux	Variété population (suffisamment homogène) « Variété parapluie » (cf. p. 492) Variété fixée Variété hybride. L’oignon a été la première espèce cultivée chez laquelle des variétés hybrides produites grâce à une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique ont été commercialisées. Le gain en rendement des hybrides peut atteindre 15 % (par rapport au meilleur parent).

Perspectives d’amélioration

La sélection privée s'est fortement ralentie en France. L'essentiel de la sélection est, à l'heure actuelle, réalisé aux États-Unis, aux Pays-Bas, en Israël et au Japon. Les objectifs majeurs de sélection sur cette espèce, difficile et longue à travailler en raison de son cycle bisannuel, de sa sensibilité à la consanguinité et aux facteurs d'environnement (longueur du jour, température), sont l'homogénéité des produits (amélioration des techniques de production d'hybrides) et la résistance aux maladies et bio-agresseurs. Les résistances sont issues d'espèces apparentées (*A. fistulosum*, *A. roylei* Walp.) et demandent du temps avant d'être utilisables dans des variétés commerciales. Les nouvelles techniques d'haplodiploïdisation, de marquage génétique et de sélection assistée par marqueurs accélèrent le processus d'introgession et de sélection, mais l'analyse des performances au champ requiert toujours la même durée.

Les perspectives de sélection ont un important potentiel : les hybridations intra- et interspécifiques n'ont encore pas toutes été évaluées et certaines possibilités physiologiques sont encore à explorer (synthèse d'arômes, bloquée ou exacerbée, déterminisme de la conservation des bulbes,...) pour déterminer les caractères génétiques à sélectionner.

Dans le même temps, la diversité génétique en oignon s'appauvrit, les mêmes variétés se retrouvant sous des latitudes identiques sur tous les continents et les variétés hybrides commerciales prenant le pas sur les variétés populations locales dans le nord de l'Europe. Toutefois, on note actuellement en France une certaine activité pour favoriser le développement de variétés locales avec des labels de qualité.

L'oignon est une plante qui porte une image forte de produit naturel et bénéfique pour la santé. La tendance récente vers son utilisation comme crudité en salade suppose de sélectionner un oignon doux. Simultanément, l'élévation de la teneur en matière sèche est toujours recherchée pour sa transformation industrielle en produit déshydraté.

Caractères à améliorer

Stabilité et homogénéité. Ces critères demeurent des objectifs essentiels pour les variétés hybrides compte tenu des difficultés pour maintenir les lignées parentales conformes (effet de consanguinité sur les lignées parentales).

Rendement. Il faut trouver un équilibre entre le rendement et la teneur en matière sèche (liée à une bonne conservation), alors que ces deux caractères sont antagonistes.

Résistances aux maladies et aux insectes. Des maladies fongiques telles que la fusariose, le mildiou, la pourriture blanche (*Sclerotium cepivorum*) ainsi que *Botrytis squamosa* et un insecte, un thrips (*Thrips tabaci*) posent toujours des problèmes. Les pourritures bactériennes (*Xanthomonas* spp.) sont des maladies émergentes appelées à se développer à l'avenir, en raison des risques de propagation par les semences.

Qualité (forme, couleur, teneur en matière sèche, teneur en composés volatils). Ces critères sont très variables selon la destination du produit.

Techniques à développer

Croisements interspécifiques. Des croisements avec *A. roylei* sont réalisés pour introduire la résistance au mildiou de l'oignon et au *Botrytis squamosa*. *A. roylei* est également employée comme « espèce pont » pour introduire des gènes d'intérêt (nombreuses résistances à des maladies) d'*A. fistulosum* chez *A. cepa*.

Multiplification végétative *in vitro*. Elle est envisagée pour le clonage des parents dans l'objectif de la création de variétés synthétiques de clones ou du maintien de lignées mâles stériles.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique particulière de variétés hybrides pour l'oignon.

1996, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste pour l'échalote et de deux rubriques : oignon, échalion.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre annexe variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 77 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 1 635 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Cette même année, 2 variétés étaient inscrites sur la liste de variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les études DHS réalisées par le GEVES, 28 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est d'un an, avec 2 cycles complets sur 2 lieux. À l'issue de ces 2 cycles d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Concernant la définition d'une « variété parapluie », il s'agit d'une variété ancienne, inscrite avant 1970, maintenue par plusieurs établissements au sein de l'Union européenne et dont les lots, maintenus par sélection conservatrice, ont divergé en raison de leurs zones géographiques de sélection et d'utilisation différentes. De ce fait, au moment de la réinscription d'une telle variété au catalogue européen, elle ne répondait plus aux critères DHS en raison de son très large spectre de définition. Une telle variété est donc subdivisée en plusieurs groupes ou variétés sur la base de leurs caractéristiques morphologiques ou physiologiques. Par exemple, la variété 'Rinjsburger' a été subdivisée en 7 variétés distinctes sur la base de la précocité et de la forme du bulbe principalement. Ainsi, chaque variété 'Rinjsburger 2', 'Rinjsburger 3', etc. doit être maintenant considérée comme une variété distincte avec une définition précise et un échantillon standard.

Pour en savoir plus

- APRIFEL, 1998-1999. Oignon. Dans : *Fiches nutritionnelles de référence*, Éditions APRIFEL, Paris, 2 p.
- Bois D., 1928. *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges*. Tome I, 498-503.
- Laligant S., 1992. Passé et devenir de l'oignon d'Auxonne ou le trouble de l'identité. Dans : *Cassis, oignons, cerises, cornichons, 4 produits des terroirs bourguignons*. Édition Écomusée de la Bresse bourguignonne, Pierre-de-Bresse, 41-76.
- Brewster J.L., 1994. *Onions and other vegetable Alliums*. CAB International, Wallingford, 236 p.
- Campion B. et Alloni C., 1990. Induction of haploid plants in onion (*Allium cepa* L.) by in vitro culture of unpollinated ovules. *Plant Cell, Tissue and Organ Cult.*, 20, 1-6.
- Chaux C. et Foury C., 1994. L'oignon. Dans : *Productions légumières*, Tec & Doc, Paris, tome II, 589-623.
- Eady C.C., 2002. Genetic transformation of onions. Dans : *Allium crop : Recent advances*. H. Rabinowitch et L. Currah, éd., CAB International, Wallingford, 119-144.
- Fischer D. et Bachmann K., 2000. Onion microsatellites for germplasm analysis and their use in assessing intra- and interspecific relatedness within the subgenus *Rhizideum*. *Theor. Appl. Genet.*, 101, 153-164.
- Foury C. et Schweisguth B., 1992. L'oignon. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 406-419.
- Jones H.A. et Clarke A.E., 1943. Inheritance of male sterility in the onion and the production of hybrid seed. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 43, 189-194.
- Klaas M. et Friesen N., 2002. Molecular markers in *Allium*. Dans : *Allium crop : Recent advances*. H. Rabinowitch et L. Currah, éd., CAB International, Wallingford, 159-185.
- Kik C., 2002. Exploitation of wild relatives for the breeding of cultivated *Allium* species. Dans : *Allium crop : Recent advances*. H. Rabinowitch et L. Currah, éd., CAB International, Wallingford, 81-100.
- van der Meer Q.P., 1993. L'oignon. Dans : *Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE Éditions, Paris, 187-196.
- Messiaen C.-M., Cohat J., Leroux J.-P., Pichon M. et Beyries A., 1993. *Les allium alimentaires reproduits par voie végétative*, INRA Éditions, Paris, 232 p.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R., 1991. Maladies des *Allium*. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 347-389.
- Messiaen C.-M. et Foury C., 2003. *Allium* (oignons, échalotes, poireaux, aulx, ciboules et ciboulettes). Dans : *Histoires de légumes. Des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 106-125.
- Moreau B., Le Bohec J., Guerber-Cahuzac B. et Leteinturier J., 1996. *L'oignon de garde*, monographie. Ctifl, Paris, 320 p.
- Péron J.-Y., 1999. L'oignon. Dans : *Productions légumières. Références*. Synthèse Agricole, Bordeaux, 415-426.
- Pitrat M., 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Ricroch A., 1996. Une brève histoire des variétés d'oignon. Bulbes haute définition. *Fruits, Légumes*, numéro hors série, 39-41.
- Roumagnac P., 2003. *Taxonomie et diversité du dépérissement bactérien de l'oignon. Études épidémiologiques du rôle des semences dans la transmission de la bactérie*. Thèse de Doctorat de l'Institut national agronomique Paris-Grignon, 220 p.
- Whitaker T.W., 1979. The breeding of vegetable crops : highlights of the past seventy-five years. *Hortscience*, 14 (3), 359-363.
- Wilkie S.E., Isaac P.G. et Slater R.J., 1993. Random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers for genetic analysis in *Allium*. *Theor. Appl. Genet.*, 86, 497-504.

L'orge

Hordeum vulgare L. ssp. *vulgare* L. ($2n = 2x = 14$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation de l'espèce

Hordeum vulgare L. subsp. *spontaneum* (K. Koch.) Thell. est l'ancêtre de l'orge cultivée. C'est une plante dont l'épi est à deux rangs avec un rachis fragile et un grain vêtu. Le caractère « rachis fragile » était propice à la dissémination des semences et absolument incompatible avec la culture de cette espèce. Une mutation du gène « rachis fragile » au locus *btr1/btr2* a donné une plante au rachis solide qui a pu être cultivée dès le Néolithique (7 000 ans av. J.-C.). *Hordeum vulgare* L. subsp. *vulgare* L. a subi ensuite d'autres mutations faisant apparaître des types à « grain nu » et des types « à six rangs ». La diversification de l'orge s'est probablement faite au Proche-Orient et en Asie centrale. La bière, produite à partir de l'orge, a été inventée par les Égyptiens au 5^e millénaire av. J.-C. et ce sont les Grecs qui ont fait connaître ce breuvage en Europe. Les Gaulois, Celtes et Saxons fabriquaient de la cervoise. Au XII^e siècle, la brasserie était une activité de la bourgeoisie. Des fleurs de houblon (*Humulus lupulus* L.) ont commencé à être incorporées à la bière au XIII^e siècle par des moines bavarois pour leurs qualités antiseptiques et gustatives. Au XIX^e siècle, l'orge était cultivée dans toute l'Europe. Les lignées sélectionnées dans les variétés populations de pays de Haute-Loire ('Orges du Puy') qui se caractérisent par une extrême sensibilité à la verse sont un exemple typique des populations autrefois cultivées. L'application de la sélection généalogique dans les meilleures populations, au début du XX^e siècle, est à l'origine de la création de variétés de type lignée pure, comme 'Sarah', beaucoup moins sensibles à la verse. Une autre étape, marquée par d'importants progrès en matière de résistance à la verse et de rendement, a été franchie par la sélection généalogique après hybridation (variétés 'Kenia' et 'Rika'). La création de variétés plus performantes a été un moteur de l'extension de la culture de cette espèce qui est passée, en France, de 5 % en 1900 à 33 % des surfaces céréalières en 1979.

L'orge est une espèce annuelle, autogame, multipliée par semences. En France, il n'y a pas d'espèce sauvage relativement apparentée à l'orge cultivée, sauf en

Corse où existe *Hordeum bulbosum* L., apparentée avec *H. vulgare* et pouvant donner lieu à des croisements interspécifiques, suivis ou non d'introgessions. La probabilité d'une pollinisation par une espèce sauvage est très faible. Bien que l'orge soit une espèce autogame, le taux d'allogamie peut être important en orge d'hiver (comme c'est le cas pour le blé d'hiver *Triticum aestivum* (L.) Thell.), ce qui peut poser des problèmes de flux de gènes entre champs d'orge, si ceux-ci ne sont pas assez espacés.

L'orge est la céréale dont l'aire de culture est la plus étendue dans le monde. Cette espèce, très rustique, est ainsi cultivée dans plus de 90 pays, allant du Canada et de la Suède jusqu'aux tropiques. Quelques génotypes, spécifiques d'oasis ou de zones marginales, ont sans doute disparu. Cependant, des prospections ont permis de collecter l'essentiel de la diversité naturelle de l'orge et de l'espèce sauvage *H. vulgare* ssp. *spontaneum*, diversité qui est maintenant conservée dans des collections.

D'importantes collections existent au Canada (AAC à Saskatoon), au Japon (NIAR à Tsukuba), aux États-Unis (USDA à Fort Collins), en Suède (NGB à Alnarp), en Allemagne (IPK à Gatersleben), en Éthiopie et en Syrie (ICARDA). En France, des mesures ont été prises pour accroître, diversifier et sécuriser (chambres froides, doubles de sécurité) les ressources génétiques d'orge maintenues dans les collections INRA (500 génotypes environ en 1960-1980 et près de 6 500 en 2004) et au sein de réseaux de ressources génétiques pour les céréales à paille. L'entreprise SECOBRA a longtemps été le plus grand conservateur français de variétés d'orge.

Production et utilisation

L'orge est une céréale principalement cultivée pour son grain, un caryopse (fruit sec indéhiscent), généralement vêtu (glumelles cellulosiques adhérentes), parfois nu (glumelles non adhérentes séparées au battage, il y a peu d'orges nues cultivées en Europe). De manière usuelle, on distingue en pratique deux types d'orge selon la morphologie des épis : l'orge à deux rangs (ou « distique ») et l'orge à six rangs, encore appelée « escourgeon » (orge tétrastique ou hexastique).

L'orge à deux rangs est ainsi nommée parce que le long du rachis (axe de l'épi) se succèdent de part et d'autre, avec une compacité variable, des étages de 3 épillets uniflores, dont seul, chez l'orge à 2 rangs, le central est fertile, les latéraux qui le flanquent étant stériles, d'où l'aspect d'ensemble de « 2 rangs de grains ».

Au contraire, chez l'orge à six rangs, tous les épillets sont fertiles. Les grains latéraux sont dissymétriques et un peu plus petits. Quand l'épi est assez lâche, les épillets latéraux s'imbriquent alors avec ceux du côté opposé du rachis pour donner, en section, une apparence rectangulaire, comme s'il y avait 4 rangs (orge dite « carrée » d'autrefois, orge « tétrastique »). Ces types demi-lâches sont, de loin, les plus fréquents parmi les variétés d'escourgeon d'Europe. Mais, quand les articles alternes du rachis sont très courts, l'épi est très compact, et

l'entassement des étages de grains latéraux ne peut se faire que par exacte superposition, verticalement, donnant une section nettement hexagonale, et faisant, ainsi, clairement apparaître 6 rangs vrais de grains (orge « hexastiquie »).

La taxonomie internationale du genre *Hordeum* actuellement reconnue (par l'IPGRI) est, de manière simplifiée, la suivante.

Le genre *Hordeum* comporte 34 espèces (une seule est cultivée pour son grain) qui sont généralement diploïdes à $2n = 14$ chromosomes, mais il existe des espèces sauvages tétra- ou hexaploïdes.

L'espèce cultivée *Hordeum vulgare* se divise en 2 sous-espèces :

- *H. vulgare* subsp. *vulgare*, qui rassemble toutes les orges cultivées ;
- *H. vulgare* subsp. *spontaneum*, à rachis fragile qui est l'ancêtre direct de la sous-espèce *vulgare*, et le plus souvent toujours parfaitement et facilement interfertile avec cette dernière.

Au sein des orges cultivées, on distingue ensuite des taxons de rang inférieur :

- l'orge à deux rangs appartient à la convariété : *distichon* (C. Koch) Thell qui rassemble plusieurs variétés (au sens botanique), notamment la variété *distichon* (orge classique à 2 rangs, à épi long et à grain vêtu), la variété *nudum* (L.) Alef (à grain nu) et la variété *deficiens* (Steud. ex A. Braun) (à épillets latéraux extrêmement réduits). Les types exotiques compacts et courts, à barbes en éventail appartiennent à la variété *zeocrithon* (L.) Körn ;
- les orges tétra- ou hexastiquie (cf. ci-dessus), qui appartiennent à la convariété *vulgare*. Chez l'orge hexastiquie (« vraie orge à 6 rangs »), on a les types à grain vêtu : var. *hexastichon* (L.) Aschers, ou à grain nu : var. *revelatum* Körn. Chez les types tétra- ou sub-tétrastiquie, à épi non compact, on reconnaît notamment la variété *vulgare* à grain vêtu, et la variété *coeleste* L., à grain nu.

En résumé, la déclinaison taxonomique complète d'un escourgeon standard est donc : *Hordeum vulgare* L. subsp. *vulgare* L. convar. *vulgare* var. *vulgare*. Il existe, au sein des orges cultivées exotiques, bien d'autres taxons au niveau de la variété (var.) ou de la forme (f.) que nous ne détaillerons pas ici.

La production mondiale d'orge dépasse 153 millions de tonnes. Les principaux producteurs sont la Russie (17,2 millions de tonnes), le Canada (13,2 millions de tonnes), l'Allemagne (13 millions de tonnes), la France et l'Ukraine (11 millions de tonnes), l'Espagne (10,6 millions de tonnes) et le Royaume-Uni (5,8 millions de tonnes) (données FAO, 2004).

L'orge est principalement utilisée en alimentation animale et pour la production de malt destiné à la fabrication de la bière.

Alimentation animale

L'orge a longtemps été une référence pour l'alimentation animale puisque le kilogramme d'orge a servi à définir l'Unité fourragère (UF). Le grain d'orge peut être utilisé pour alimenter les bovins, les porcs et dans certains cas, les volailles. L'orge d'hiver peut être pâturée, lorsqu'elle est au stade du tallage.

L'orge est aussi, quelquefois, récoltée en vert à épiaison, seule, ou en association avec la vesce commune (*Vicia sativa* L.).

Fabrication de la bière

Maltage. Le maltage de l'orge est réalisé en trois étapes essentielles. La première étape, la trempage, consiste à fournir aux grains d'orge, en alternance, de l'eau et de l'air jusqu'à ce qu'ils atteignent une humidité d'environ 45 %. Dans la 2^e étape, la germination, les grains sont placés dans des germoirs avec maintien d'une température inférieure à 15 °C pendant une durée de 5 à 7 jours. Ceci conduit à la synthèse de toute une série d'enzymes hydrolytiques. Enfin, dans une dernière étape, le touraillage, le grain est desséché par chauffage jusqu'à 4 % d'humidité. Ce traitement, tout en respectant les enzymes produites au cours de la germination, donne l'arôme, voire la couleur au grain de malt. 100 kg d'orge permettent de produire 75 kg de malt qui pourront servir à fabriquer 610 litres de bière. Le malt est également employé pour fabriquer du whisky.

Brassage. Le brassage permet la saccharification de l'amidon. Le malt est donc moulu et mélangé à de l'eau chaude avant d'être porté à ébullition. Après filtration, des fleurs de houblon ou divers extraits sont ajoutés pour l'arôme. Après refroidissement pour déclencher la fermentation, on introduit les levures (*Saccharomyces cerevisiae*). La fermentation peut se faire pendant des temps variables et à des températures basses ou élevées.

La bière est ensuite mise en garde pendant plusieurs semaines à plusieurs mois avant d'être filtrée, conditionnée et pasteurisée.

Histoire des variétés cultivées en France

Les variétés d'orge sont notamment désignées en fonction de la durée du cycle végétatif. Ainsi, on distingue principalement trois catégories : l'orge d'hiver, l'orge de printemps et l'orge alternative.

L'orge d'hiver est une orge qui, pour accomplir l'ensemble de son cycle, doit recevoir des températures vernalisantes (environ 8 semaines à des températures inférieures à 8 °C). Elle est nécessairement semée à l'automne.

L'orge de printemps est une orge qui ne nécessite pas de températures vernalisantes pour accomplir l'ensemble de son cycle. Elle est, en général, semée à la sortie de l'hiver.

L'orge alternative est une orge qui a un besoin plus faible en températures vernalisantes que l'orge d'hiver (entre 2 à 6 semaines environ) pour accomplir l'ensemble de son cycle. Elle est semée soit en automne, soit dans le courant de l'hiver.

Variétés anciennes

Jusqu'au début du XX^e siècle, on cultivait dans toute l'Europe des populations d'orge. En France, on peut citer :

- **'Baillarges'** et **'Orges du Puy'**. Ces populations d'orge de printemps à deux rangs à grain fin étaient surtout cultivées pour la brasserie. Elles étaient très sensibles à la verse. Elles ont servi de sources pour la sélection généalogique de lignées pures ;
- **'Ile de Ré'**, variété population d'orge d'hiver à 6 rangs qui se distinguait des variétés de l'époque par sa productivité et sa précocité. Cette variété, extrêmement sensible au froid et à la verse, est résistante aux virus des mosaïques.

Variétés récentes

Orge d'hiver à 6 rangs (escourgeon)

1937, **'Hâtif de Grignon'** (Brétignière, France), première variété lignée pure inscrite en France. Cette variété a été sélectionnée dans la population d'escourgeon 'Ile de Ré'. Elle était plus productive et plus résistante à la verse que les variétés populations contemporaines. Sa grande précocité a assuré son succès dans l'ouest de la France.

1959, **'Arès'** (INRA, France), variété lignée pure. Sa paille courte lui conférait une bonne résistance à la verse.

1963, **'Ager'** (INRA, France), variété qui a marqué un grand progrès dans la résistance à la verse et qui a été utilisée comme géniteur dans toute l'Europe. Elle avait, cependant, le défaut de produire un grain un peu petit.

1969, **'Astrix'** (Desprez, France), variété résistante à la verse.

1973, **'Robur'** (INRA, France), variété alliant précocité, productivité et résistance à la verse.

1977, **'Barberousse'** (Ringot, France), variété très précoce et très productive bien adaptée à la culture dans la zone sud de la France.

1979, **'Plaisant'** (Group. Agricole Essonnois Semences, France), variété d'escourgeon à aptitude brassicole. Cette variété, qui allie productivité et précocité, a été la plus utilisée en brasserie pendant une vingtaine d'années.

1981, **'Gerbel'** (Desprez, France), variété fourragère très productive.

1985, **'Express'** (SERASEM, France), variété d'orge d'hiver alliant productivité et résistance à la mosaïque jaune (pathotype Y1).

1995, **'Esterel'** (SECOBRA Recherches, France), première variété d'orge à 6 rangs résistante à la mosaïque modérée et à la mosaïque jaune et ayant une aptitude brassicole.

2000, **'Siberia'** (SECOBRA Recherches, France), variété connaissant un grand développement européen, en raison de sa précocité et de son alternatifivité qui lui confèrent des possibilités de culture dans des conditions climatiques très diverses.

2004, **'Mosaic'** (SECOBRA Recherches, France), variété fourragère précoce. C'est la première variété française résistante à la fois à la mosaïque modérée et aux pathotypes Y1 et Y2 de la mosaïque jaune.

Orge d'hiver à 2 rangs

1937, **'Probstdorf'** (E. von Tschermack, Autriche), première variété d'orge d'hiver à 2 rangs, de type lignée pure. Cette variété a connu un certain succès du fait de sa résistance à la verse.

1972, **'Alpha'** (INRA, France), première variété importante de ce type en France. Elle était résistante à la verse et était aussi bien adaptée aux zones nord que sud.

1974, **'Sonja'** (Engelen, Pays-Bas), variété néerlandaise longtemps en tête des emblavements en France.

1983, **'Magie'** (SERASEM, France), variété très résistante au froid et à la verse et très productive.

1986, **'Pastoral'** (SECOBRA Recherches, France), variété fourragère très productive qui a été développée dans toute l'Europe.

1987, **'Clarine'** (SECOBRA Recherches, France), variété brassicole, la plus cultivée de ce type jusqu'en 2000.

1991, **'Labéa'** (Breun, Allemagne), une des premières variétés brassicoles de ce type tolérante à la mosaïque jaune.

1993, **'Angora'** (Breun, Allemagne), variété à productivité limitée, mais dont la qualité brassicole est proche de celle des variétés de printemps.

1998, **'Naturel'** (SERASEM, France), variété brassicole tolérante à la jaunisse nanisante de l'orge.

Orge de printemps à 2 rangs ou 6 rangs (la plupart sont à 2 rangs)

Au début du XX^e siècle, **'Sarah'** (1903, SECOBRA, France) et **'Comtesse'** (1937, SECOBRA France), deux variétés d'orge de printemps de type lignée pure résultant de l'application de la sélection généalogique dans les meilleures populations. D'un grain d'aussi bonne qualité que celle du grain des populations, elles étaient beaucoup moins sensibles à la verse. 'Sarah', variété sélectionnée dans la population 'Vitry-Le-François', a apporté une nette amélioration dans la résistance à la verse.

1937, **'Kenia'** (Station d'Abed, Danemark), une des premières variétés de type lignée pure. Cette variété danoise a constitué un progrès qualitatif majeur pour la résistance à la verse. Supportant un certain niveau de fumure azotée, elle a été beaucoup cultivée en France avant la seconde guerre mondiale.

1951, **'Rika'** (Weibull, Suède), variété suédoise nettement plus résistante à la verse que 'Kenia'. Elle a fait accomplir à la culture et à la sélection de l'orge de printemps un pas décisif et a été cultivée en France.

1954, '**Beka**' (SECOBRA, France), variété de bonne qualité brassicole. Cette variété est encore cultivée en Espagne.

1958, '**Vada**' (IVP, Wageningen, Pays-Bas), variété possédant une résistance horizontale à l'oïdium. Cette variété, qui était plutôt une démonstration de l'intérêt de la résistance dite horizontale, n'a pas été cultivée en France.

1962, '**Cérès**' (INRA, France), variété fourragère alliant une bonne productivité, une résistance à la verse, une bonne rusticité et un assez gros grain.

1969, '**Julia**' (Cebeco, Pays-Bas), variété fourragère, très productive qui a fait une carrière d'une douzaine d'années.

1972, '**Bérénice**' (INRA, France), variété ayant marqué une étape importante dans l'amélioration de la résistance à la verse. Elle possède aussi l'intérêt d'être productive et très résistante à l'oïdium.

1973, '**Triumph**' (VEB, Allemagne), variété allemande productive, semi-naine (caractère provenant de mutagenèse induite) et brassicole. Cette variété rentre dans la généalogie d'un grand nombre de nouvelles variétés.

1974, '**Aramir**' (Cebeco, Pays-Bas), variété fourragère possédant une résistance verticale vis-à-vis de l'oïdium. Une version « multilignées » dérivée de celle-ci nommée 'Grand-Prix', polymorphe notamment pour la résistance à l'oïdium, a été inscrite en 1981 (L.B. Wiersum, Pays-Bas) mais n'a pas connu un grand développement en culture.

1977, '**Menuet**' (Van der Have, Pays-Bas), variété relativement satisfaisante pour la brasserie qui a été, en 1985, la variété la plus cultivée en France.

1978, '**Nudinka**' (Von Rümker, Allemagne), variété d'orge à grain nu possédant une très faible teneur en cellulose. Cette variété manquait de productivité et son grain avait une sensibilité trop grande au battage pour connaître un grand succès commercial.

1979, '**Béatrice**' (INRA, France), variété précoce, remarquable par sa résistance polygénique à la verse.

1985, '**Prisma**' (BV Landbouwbureau Wiersum, Pays-Bas), une des variétés les plus cultivées en France pour la brasserie entre 1989 et 1997. Elle est relativement sensible aux maladies et n'a jamais été inscrite au catalogue officiel français.

1986, '**Natasha**' (UNISIGMA, France), variété à orientation brassicole, qui a été un des meilleurs compromis à l'époque entre productivité, résistance aux maladies et utilisation pour la brasserie.

1987, '**Alexis**' (Breun, Allemagne), variété possédant le gène *mlo* de résistance à l'oïdium.

1988, '**Volga**' (SECOBRA Recherches, France), variété de type *erectum* (à épi à port érigé) très productive et utilisée en brasserie.

1989, '**Nomad**' (Nickerson RPB, Royaume-Uni et Nickerson S.A., France), variété brassicole, la plus cultivée en 1991.

1991, **‘Vodka’** (Florimond Desprez, France), première variété issue d’haplométhode (système *H. bulbosum*) inscrite en France. C’est une variété brassicole.

1993, **‘Nevada’** (SECOBRA Recherches, France), variété pouvant être utilisée en brasserie, se distinguant par une bonne rusticité et un bon potentiel de rendement.

1996, **‘Scarlett’** (Breun, Allemagne), variété de bonne qualité brassicole, productive et résistante à l’oïdium, la rhynchosporiose et l’helminthosporiose. Toutes ces qualités lui ont valu d’occuper la première place des ventes en 2000.

1997, **‘Anisa’** (Carlsberg, Danemark), variété brassicole sans pro-anthocyanidine, mais qui possède le défaut d’être assez sensible aux maladies.

2004, **‘Frilox’** et **‘Outlox’** (SECOBRA Recherches, France), premières variétés brassicoles à faible teneur en lipoxygénase. Ce caractère du grain permet de limiter la dégradation des acides gras dans la bière et de ce fait l’apparition de faux goûts dans le produit.

Remarque. La sélection a eu un effet très positif sur la variabilité, notamment grâce aux croisements interspécifiques, à la mutagenèse induite et surtout aux brassages génétiques réalisés avec des variétés d’origines très diverses (Éthiopie, Japon...), lors de travaux de présélection et de sélection. De nombreux gènes d’intérêt ont ainsi été introduits par croisements avec des types exotiques. La diversité génétique de l’orge mérite encore d’être étudiée et davantage exploitée. Des analyses ont montré que, par exemple, des populations exotiques d’orge contenaient des gènes de résistance à la sécheresse. De même, le marquage moléculaire a permis de découvrir, dans la variété d’orge fourragère nord-américaine ‘Dicktoo’, un allèle favorable à l’augmentation du pouvoir diastasique, donc utile en brasserie.

Regard sur 50 ans de sélection

L’effort de sélection, en France comme en Europe, avait porté depuis la fin du XIX^e siècle sur les variétés de printemps, seules intéressant l’industrie de la brasserie qui finançait la sélection (par exemple, la SECOBRA). Il avait surtout consisté à stabiliser la production en améliorant la résistance à la verse et à augmenter la productivité.

Les orges d’hiver avaient été très peu améliorées et elles restaient peu cultivées, en dépit de leur bonne adaptation à l’écologie de beaucoup de régions. À partir de 1946, l’INRA a entrepris de corriger cette situation en utilisant des croisements entre des variétés d’hiver d’origine très diverses (‘Bordia’, ‘Hâtif de Grignon’, ‘Probstdorf’, etc.) et des variétés de printemps d’origine scandinave, très cultivées en France comme ‘Kenia’. Les lignées issues de ce travail (‘Ager’ inscrite en 1963, ‘Alpha’ en 1972) ont connu un grand succès. Du matériel expérimental en F₂ a été donné par l’INRA aux établissements de sélection (variété ‘Astrix’ inscrite en 1969). Ce progrès génétique a sans doute contribué à

l'expansion de l'orge d'hiver en France à partir de 1965 : en dix ans, sa superficie a été multipliée par 4 et le rendement moyen est passé de 30 à 45 q/ha.

L'introduction de résistances monogéniques à la verse (gènes de semi-nanisme) ou polygéniques a permis de faire d'importants progrès pour ce caractère. Le rendement a connu une progression annuelle de l'ordre de 1,2 q/ha depuis 1970. L'introduction de nombreuses résistances aux maladies telles que l'oïdium, l'helminthosporiose et différentes viroses ont été des facteurs importants de stabilisation du rendement. La création de variétés moins sensibles aux maladies permet de limiter les traitements fongicides à un seul traitement, alors qu'il en faut au moins deux pour des variétés moins résistantes.

L'amélioration de la qualité n'a pas été absente des programmes de sélection. Les sélectionneurs ont créé des variétés adaptées à l'alimentation animale (grande finesse des glumelles, bonne teneur en protéines, faible teneur en β -glucanes...) et d'autres adaptées à la brasserie (teneur élevée en extrait, fort pouvoir diastatique, indice Kolbach élevé...). Dans ce dernier cas, il faut souligner l'intérêt de la filière industrielle pour l'amélioration de la matière première et son développement par la création, dès 1902, de la Société d'encouragement à la culture de l'orge de brasserie en France (SECOBRA).

Enfin, pour l'orge de printemps en particulier, une pratique s'est largement développée depuis 20 à 30 ans : le recours aux « générations dérobées » effectuées à contre-saison dans l'hémisphère Sud. Cette pratique permet de progresser deux fois plus vite vers l'homozygotie et de multiplier les plantes haploïdes doublées (HD) à grande échelle pour les pépinières.

Caractères importants améliorés

Orge de printemps

Actuellement, la quasi-totalité de l'orge de printemps cultivée en France est à orientation brassicole.

Rendement. Des augmentations de rendement de l'ordre de 1,2 q/ha/an (depuis 1970) ont été obtenues. De nombreux auteurs estiment que la moitié de ce progrès est d'origine génétique. Le rendement en orge de printemps peut être estimé actuellement à 60 q/ha.

Qualité brassicole. La qualité brassicole a très fortement progressé. Elle est influencée par de nombreux facteurs, dont certains dépendent, plus ou moins selon le cas, de la variété.

■ FACTEURS PHYSIQUES

Poids élevé de mille grains. Ce paramètre est corrélé positivement avec la richesse en amidon et l'énergie germinative. Il est également très corrélé au calibrage : ainsi le pourcentage du grain restant au-dessus d'un tamis à maille de 2,5 mm de diamètre est un critère très utilisé par les malteurs et lors de l'inscription au catalogue officiel français.

Énergie germinative. Lors du maltage, les grains doivent germer à 95 % en moins de quatre jours. Des variétés ayant une excellente énergie germinative ont été recherchées. Ce caractère dépend en partie de la finesse des enveloppes. Une enveloppe fine permet à l'orge de s'imbiber rapidement, ce qui est un préalable à une germination rapide.

■ CARACTÉRISTIQUES TECHNOLOGIQUES

Teneur en extrait fermentescible. L'extrait fermentescible est constitué de l'ensemble des substances résultant de l'action des amylases sur le dédoublement de l'amidon en dextrines et maltose. Plus les enveloppes (glumelles) du grain sont fines et plus la teneur en amidon est importante. Ceci permet d'avoir une teneur élevée en extrait diastasique. Les variétés ayant une bonne valeur brassicole se caractérisent par un pourcentage d'enveloppes inférieur à 8 %.

Teneur en protéines. Des variétés possédant un taux inférieur à 11,5 % ont été sélectionnées afin d'obtenir une bière qui se clarifie et se conserve bien. Ce caractère est très corrélé négativement avec le taux d'extrait diastasique. Son étendue de variation génétique est modérée, mais 0,5 ou 1 % d'origine génétique peut être décisif pour accepter ou rejeter un lot à un seuil donné.

Indice Kolbach. Cet indice de désagrégation, qui se calcule en faisant le rapport protéines solubles / protéines totales, a été notablement amélioré.

Pouvoir diastasique, viscosité et teneur en β -glucanes. Mesurer le pouvoir diastasique d'un extrait revient à doser la capacité globale d'un malt à hydrolyser l'amidon en sucres fermentescibles, donc principalement les activités α - et β -amylases. La viscosité et la teneur en β -glucanes sont des éléments qui lorsqu'ils ont des valeurs faibles, sont une garantie pour une bonne filtration au cours du brassage. Le pouvoir diastasique, la viscosité et la teneur en β -glucanes ont été l'objet de sélection et d'amélioration.

Couleur et odeur du grain. Des variétés produisant des grains qui développent une couleur ou une odeur particulière ont été sélectionnées.

Teneur en tannins. Les tannins en excès sont susceptibles de poser des problèmes de trouble colloïdal à basses températures. Des variétés sans pro-anthocyanidine ont été obtenues par mutagenèse induite ('Anisa').

Qualité pour l'alimentation animale

Une productivité en grains élevée est en fait le premier critère recherché.

Le poids spécifique du grain. C'est le seul autre critère officiel dans les transactions commerciales. Ces deux caractères ont été améliorés par la sélection.

Finesse des glumelles et grosseur des grains. Ces caractères sont importants pour l'alimentation animale, car ils sont directement corrélés avec la concentration énergétique (amidon). Les variétés à grain nu sont plus énergétiques, mais sont aussi malheureusement moins productives.

Faible teneur en β -glucanes. Les β -glucanes des parois cellulaires du grain génèrent une viscosité nuisible à la digestibilité des aliments. Des variétés à teneur réduite en β -glucanes (environ 3 % de la matière sèche) ont été sélectionnées. Par ailleurs, des mutants avec moins de β -glucanes (2,2 %) ont été obtenus, mais ils présentent des défauts importants d'adaptation. Ce caractère pourrait retenir l'attention à l'avenir, dans un parcours d'inscription au catalogue officiel.

Richesse en protéines et teneur en lysine. Ce critère est quelque peu valorisé lors de l'inscription, dans une optique d'alimentation animale. Il est rarement pris en compte dans les transactions en France, mais les fabricants d'aliments du bétail en tiennent souvent compte dans leurs formulations. Ce caractère est fortement corrélé négativement avec le rendement en grains au plan génétique et environnemental. De ce fait, la variation génétique effectivement utilisable ne dépasse pas 0,8 à 1,5 % de la matière sèche, ce qui rend illusoire un progrès significatif pour ce caractère par la voie génétique (tandis qu'une application maîtrisée de la fumure azotée permet de le gérer au mieux).

Le taux de lysine dans les protéines totales de certaines variétés d'orge ('Hiproly', 'Lysimax') dépasse 4 % alors qu'une variété classique contient environ 3,5 % de cet acide aminé essentiel indispensable, notamment pour les jeunes animaux monogastriques en croissance. Malheureusement, ces variétés ne sont guère cultivées en France car leur productivité et leur adaptation demeurent insuffisantes en dépit de nombreux cycles de sélection intensive. En revanche, dans les pays comme l'Éthiopie où les conditions de culture sont moins favorables et où les potentiels maximaux de rendement ne sont jamais atteints, ces variétés pourraient présenter un certain intérêt.

Résistance aux maladies

Oïdium (*Blumeria graminis*, anciennement *Erysiphe graminis*). Les progrès ont été continus grâce à l'utilisation du gène récessif *mlo* qui a apporté une résistance durable vis-à-vis de ce champignon dans les variétés de printemps.

Rouille naine (*Puccinia hordei*). Diverses sources de résistance ont été utilisées : des résistances verticales souvent contournées et plus récemment des gènes de résistance partielle.

Orge d'hiver

Rendement. Il a très fortement progressé. Actuellement, le rendement moyen national français en orge d'hiver à 6 rangs est d'environ 70 q/ha. Mais, le rendement moyen dans les essais intensifs bien conduits ou dans des régions très productives comme la Picardie est souvent plus près de 90-95 q/ha.

Qualité brassicole. Des variétés brassicoles d'escourgeon et d'orge à deux rangs ont été sélectionnées, mais beaucoup plus récemment qu'en orge de printemps.

Résistance aux maladies

■ VIROSES

Mosaïque jaune et mosaïque modérée. Ces maladies sont causées par deux virus proches : le virus de la mosaïque jaune de l'orge (VMJO ou *Barley yellow mosaic virus*, BaYMV) et le virus de la mosaïque modérée de l'orge (VMMO ou *Barley mild mosaic virus*, BaMMV) transmis tous deux par un champignon du sol, *Polymyxa graminis*. La mosaïque jaune, décrite pour la première fois au Japon en 1940, l'a été en France vers 1978. Des variétés telles qu'‘Express’ possèdent le gène *rym4* qui confère une résistance aux souches les plus communes de mosaïques modérée et jaune et qui a été introduit dans de nombreuses variétés. Un nouveau pathotype de la mosaïque jaune, Y2 surmontant *rym4*, est apparu en 1989. Des résistances ont été trouvées, d'une part dans des variétés françaises de pays (par exemple, ‘Comte de Serre’) et d'autre part dans des variétés d'orge d'Extrême-Orient. L'orientation des sélectionneurs est désormais axée vers la résistance à la mosaïque jaune de pathotype Y2. Il existe, depuis 2 ou 3 ans en Champagne, un nouveau pathotype de mosaïque modérée, contournant les résistances classiques aux pathotypes Y1 et Y2. Pour créer une résistance durable, une solution pourrait être de combiner, grâce au marquage moléculaire, plusieurs gènes de résistance parmi les 15 gènes identifiés. Il s'agit généralement de gènes récessifs conférant une immunité (résistance totale) à l'une ou l'autre des mosaïques.

Jaunisse nanisante de l'orge. Cette maladie causée par un ensemble de virus proches (virus de la jaunisse nanisante de l'orge, VJNO ou *Barley yellow dwarf virus*, BYDV) est transmise par plusieurs espèces de pucerons. Cette maladie est susceptible de provoquer des pertes de rendement de l'ordre de 50 % ou même davantage. Un gène majeur au locus *Ryd2*, découvert aux États-Unis en 1959 dans des lignées éthiopiennes, a été utilisé pour créer des variétés tolérantes dont les premières, ‘Atlas 68’ et ‘CM 67’ (université de Californie, Davis, États-Unis), datent de 1969. Très récemment, un nouveau gène de tolérance *ryd3* a été décrit ouvrant de nouveaux espoirs de lutte génétique contre cette maladie.

■ MALADIES FONGIQUES ATTAQUANT L'ORGE D'HIVER ET L'ORGE DE PRINTEMPS

Helminthosporiose à Pyrenophora teres. Ce champignon cause, couramment, des pertes de rendement comprises entre 10 et 30 %. De nombreuses variétés assez résistantes à cette maladie ont été sélectionnées, notamment grâce à l'introgession de gènes de résistance provenant de variétés telles qu'‘Arivat’. Il existe au moins 3 gènes majeurs de résistance qui ont été identifiés.

Oïdium et rouille naine (cf. Orge de printemps)

Rhynchosporiose (Rhynchosporium secalis). Les dégâts causés par cette maladie peuvent être spectaculaires, mais des traitements fongicides permettent de la contrôler assez bien. Des gènes majeurs de résistance ont été introduits, souvent assez rapidement contournés, mais il existe aussi des résistances partielles satisfaisantes qui sont présentes dans quelques variétés.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI De nombreux gènes de résistance (oïdium, rouille jaune et mosaïques) ont été utilisés avec succès.
Mutagenèse induite	OUI en France L'étude de la FAO/IEAE a répertorié 12 variétés françaises d'orge porteuses d'une mutation induite ('Baraka', 'Bétina',...).
	OUI dans le monde L'étude de la FAO/IEAE a permis de recenser 269 variétés d'orge porteuses d'une mutation induite. Parmi elles : – la mutation <i>ant</i> conduit à des variétés sans pro-anthocyanidine. Les variétés ainsi obtenues n'ont pas eu de développement commercial en France ('Anisa') ; – plusieurs mutations de nanisme ont été obtenues et introduites dans des variétés ('Triumph', 'Gallis' au Royaume-Uni...) ; – la mutation de semi-nanisme <i>denso</i> est probablement présente dans plus de 150 variétés réparties sur tous les continents.
Croisements interspécifiques	AUCUNE Jusqu'à présent, l'orge sauvage <i>H. v. ssp. spontaneum</i> , est une bonne source de résistance aux maladies. Des croisements interspécifiques plus difficiles sont également tentés avec <i>H. bulbosum</i> .
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE Des orges tétraploïdes peuvent apparaître spontanément, mais elles ne présentent pas d'intérêt agronomique particulier.
Transgénèse	1^{re} transformation. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce au début des années 1990. Essais au champ et caractères travaillés. Une dizaine d'essais au champ de variétés d'orge transgénique ont été réalisés aux États-Unis en 2000 et quelques essais ont aussi été mis en place en Europe (Allemagne, Finlande et Suisse). La transgénèse s'attache à produire, en particulier, des orges résistantes aux maladies virales et à la fusariose ou des orges ayant une meilleure qualité brassicole du fait de la surexpression d'une β -glucanase thermostable, enzyme capable de dégrader plus efficacement la paroi des grains au cours du maltage. Il n'existe pas de variété transgénique d'orge, autorisée à la commercialisation, dans le monde.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	OUI Le croisement interspécifique avec <i>H. bulbosum</i> (gynogenèse <i>in situ</i>) est utilisé pour produire des plantes haploïdes et accélérer le processus de création variétale. La première variété obtenue par cette méthode date de 1979 ('Mingo' au Canada). La culture d'anthers <i>in vitro</i> (androgenèse <i>in vitro</i>) est également utilisée pour produire des plantes haploïdes à des fins de création variétale ('Boréale').

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	OUI Des stérilités mâles nucléaires (par exemple, gène <i>msg6</i>) sont utilisées pour réaliser des brassages génétiques en présélection. ESSAIS Des croisements interspécifiques avec <i>H. v. ssp. spontaneum</i> ont permis l'obtention d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique et des lignées restauratrices de fertilité. Des variétés hybrides d'orge fourragère d'hiver utilisant une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique sont actuellement testées au Royaume-Uni. Des stérilités mâles nucléaires et des gamétocides sont également disponibles. Une stérilité nucléaire a été utilisée pour la production de semences d'une variété ('Hembar', 1969, université de l'Arizona, États-Unis).
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Plusieurs cartes génétiques saturées en marqueurs ont été établies notamment grâce à l'usage de lignées recombinées issues d'haplodiploïdisation. Certaines cartes comprennent plus de 1 000 marqueurs. Des gènes intervenant dans la taille et la dormance du grain, le pouvoir enzymatique, le taux d'extrait de malt, la teneur en α-amylase, le taux de protéines solubles / protéines totales, l'haplodiploïdisation (<i>hap</i>), la tolérance aux sols salins et diverses maladies (oïdium, helminthosporiose, jaunisse nanisante...) ont déjà été identifiés par marquage moléculaire. Des QTL sont recherchés pour les différents composants de la qualité brassicole. Les marqueurs sont actuellement utilisés pour faire de la sélection assistée par marqueurs afin d'introduire les gènes de résistance à la jaunisse nanisante et à la mosaïque jaune. Des gènes d'intérêt ont déjà été clonés : gènes de β-amylase....

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection généalogique Sélection par filiation monograine (SSD) Sélection généalogique différée (méthode <i>bulk</i>) Haplométhode
Types variétaux	Variété population. C'était la structure variétale des variétés antérieures à 1937. Variété lignée pure. Toutes les variétés cultivées actuellement en France sont de ce type. Variété hybride. Des variétés hybrides sont en expérimentation au Royaume-Uni depuis 2001 et en France depuis 2003.

Perspectives d'amélioration

L'amélioration variétale de l'orge s'oriente de plus en plus vers la recherche de variétés adaptées à des itinéraires économes en intrants et présentant des résistances durables vis-à-vis des virus et des champignons pathogènes. Les myco-toxines sont un vaste problème nécessitant la mise en place de programmes de recherche et d'acquisition de connaissances.

Pour l'introduction de gènes de résistances partielles oligogéniques notamment, le recours au marquage moléculaire et à la sélection assistée par marqueurs est un atout majeur.

Caractères à améliorer

Orge d'hiver et orge de printemps

Qualité brassicole. La qualité brassicole des variétés d'orge d'hiver doit être améliorée. En ce qui concerne les variétés de printemps, ce caractère est actuellement globalement satisfaisant. Il est nécessaire de le conserver dans les variétés futures.

Rendement. La productivité et la régularité de rendement sont deux critères très importants surtout pour les variétés d'orge de printemps. Pour les variétés d'orge d'hiver à six rangs, des essais ont été menés depuis 2000 au Royaume-Uni, sur des variétés hybrides qui montrent un rendement supérieur de 10 à 15 % par rapport à celui des variétés classiques. Ceci ne concerne que des variétés d'orge fourragère. En effet, la production de semences est effectuée à l'aide d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique et la plante mâle stérile est semée en mélange avec le pollinisateur pour réduire le coût de la production des semences hybrides. La récolte au stade de la consommation est donc également un mélange, ce qui est incompatible avec une utilisation en malterie.

Généralisation des résistances aux différentes viroses. Les mosaïques ou la jaunisse nanisante sont des maladies très pénalisantes. Le caractère de résistance ou de tolérance devrait être généralisé à toutes les variétés en diversifiant les gènes utilisés et en les combinant dans une même variété.

Résistance à la verse. La résistance à la verse est encore insuffisante, notamment pour les variétés d'orge d'hiver à six rangs.

Meilleure efficacité d'utilisation de l'azote. Dans l'optique du développement de l'agriculture raisonnée, des variétés nécessitant moins d'engrais seraient très intéressantes.

Résistance aux maladies fongiques

Rouille naine (*Puccinia hordei*). Une petite dizaine de gènes de résistance a été utilisée pour créer des variétés résistantes. Il serait intéressant d'essayer de sélectionner des résistances durables.

Résistance à la rhynchosporiose (*Rhynchosporium secalis*). Cette maladie est importante, surtout dans l'ouest de la France, sur l'orge d'hiver. La lutte génétique contre ce champignon est un véritable défi, car il possède une capacité de variation telle qu'il ne semble pas exister de résistance totale.

Résistance aux champignons produisant des mycotoxines. Certains champignons comme les *Fusarium* peuvent se développer sur les grains d'orge en produisant des mycotoxines, surtout des trichothécènes, dont la plus fréquente est le déoxynivalénol

(DON). Ces substances sont susceptibles de se retrouver dans la bière ou d'altérer le processus de sa fabrication. Une réglementation européenne fixe, à partir du 1^{er} juillet 2006, à 1 250 mg par tonne la teneur maximale en DON des grains vendus à la 1^{re} transformation. Ceci explique en partie le regain d'intérêt pour les recherches sur les fusarioses. Le défi à relever est double : il faut à la fois mettre en évidence des différences génétiques de sensibilité variétale à la fusariose et établir le lien entre une résistance à la fusariose et l'absence de production de toxines.

Helminthosporiose à *Helminthosporium gramineum* et au *charbon nu* (*Ustilago nuda*). Ces deux maladies, redoutables avant les années 1960, sont actuellement combattues par des traitements fongicides de semences. Dans le cas de parcours d'agriculture biologique, les fongicides, même en traitement de semences, peuvent être interdits et de nouveaux programmes sur ces caractères sont réengagés, après 30-40 ans, en Allemagne et en Italie en particulier.

Techniques à développer

Les techniques de marquage moléculaire vont certainement continuer à se développer, notamment dans l'optique de créer des résistances durables aux maladies en associant plusieurs gènes ou pour améliorer certains critères technologiques. L'haplométhode (cf. encadré ci-dessous) donne de bons résultats chez l'orge. L'association haploïdisation / marquage moléculaire devrait se développer chez cette espèce et permettre une bonne exploitation des ressources génétiques.

L'haploïdie chez l'orge

L'haploïdie, cette anomalie de la reproduction, a d'abord été juste signalée chez l'orge en 1934. Puis, elle est apparue comme un phénomène inductible, d'abord en 1970, par croisement avec l'orge bulbeuse, *H. bulbosum*, puis en 1981, par culture d'anthères *in vitro*. C'est la « méthode *bulbosum* » qui a d'abord été la plus utilisée. Des épis castrés d'orge cultivée sont pollinisés par *H. bulbosum*. Dans les embryons formés, les chromosomes de *H. bulbosum* s'éliminent. Entre 1 et 5 lignées haploïdes doublées peuvent être obtenues par épi castré, après culture d'embryons *in vitro* et doublement du stock chromosomique à la colchicine. La production de plantes haploïdes, par culture *in vitro* d'anthères ou de microspores isolées, connaît actuellement un regain d'intérêt, bien que la réussite de ces dernières techniques dépende fortement du génotype et que de nombreuses plantes albinos soient générées.

D'autres techniques, telles que la culture *in vitro* d'ovaires non fécondés ou l'utilisation d'un gène inducteur d'haploïdie, ont été moins fructueuses. La culture d'ovaires ne s'est pas développée du fait de son faible rendement (environ 0,4 %). L'induction par le gène *Hap n* a pas pu non plus être appliquée en sélection, du fait de la difficulté de repérage des plantes *Hap/Hap* (homozygotes pour le gène *Hap*) et de la forte mortalité des embryons *Hap/Hap*. L'haploïdisation est devenue une méthode employée en routine par les sélectionneurs pour obtenir, dans un court délai, des milliers de lignées pures et l'haplométhode est à l'origine de plusieurs dizaines de variétés d'orge inscrites dans le monde. Par ailleurs, la plupart des constructions de cartes génétiques à l'aide de marqueurs moléculaires est basée sur l'utilisation de plantes haploïdes doublées.

Inscription et protection des variétés en France

1937, ouverture du catalogue orge.

1964, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste blé, orge, avoine et riz.

1989, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique orge à orientation brassicole.

1992, création d'une liste spéciale de variétés dont les semences peuvent être multipliées et fournies en France.

Les brasseries Bush (États-Unis) souhaitent s'installer en France, pourvu qu'elles puissent cultiver leurs variétés. Le CTPS avait donc proposé l'inscription, à titre provisoire et pour une durée de 3 ans sur une liste spéciale, de 2 variétés d'orge de printemps d'origine nord-américaine ('Ursula' et 'Prudentia'), dont les semences devaient être multipliées et fournies en France à des agriculteurs, dans le seul cadre de contrats d'intégration. Ces 2 variétés n'ont pas connu de développement (inadaptation aux conditions pédoclimatiques françaises) et sont aujourd'hui radiées du catalogue. La section céréales du CTPS a donc recommandé de ne pas ouvrir de liste de Variétés à usages industriels réservés (VUIR) en céréales à paille.

En 2003, 237 variétés d'orge étaient inscrites (dont les trois-quarts dans la rubrique à orientation brassicole) au catalogue officiel français et 962 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 29 caractères morphologiques et physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 ans. À l'issue de ces 2 années, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie, quant à lui, une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères requis de valeur agronomique et technologique (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par les 3 variétés les plus multipliées. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Les variétés reconnues brassicoles sont transférées sur la rubrique des variétés à orientation brassicole. Dans le cas de ce type de variété, l'inscription au catalogue n'est que la première étape pour qu'une variété connaisse un succès commercial. En effet, une variété doit réussir aussi les tests imposés par les malteurs et les brasseurs afin d'être inscrite sur la liste recommandée des Malteurs et Brasseurs de France.

Le CTPS a contribué à orienter la sélection afin d'obtenir des variétés :

- productives, en faisant évoluer, chaque année, le témoin de référence en fonction des variétés les plus multipliées ;
- résistantes aux maladies cryptogamiques (oïdium, rhynchosporiose, helminthosporiose, rouille brune), aux accidents climatiques (verse), à la mosaïque jaune et à la mosaïque modérée. Aujourd'hui, pratiquement toutes les variétés d'orge d'hiver sont résistantes aux pathotypes les plus répandus de mosaïques modérée et jaune ;
- à haute valeur brassicole, pour les variétés destinées à la brasserie, plus particulièrement au niveau des cinq critères retenus pour l'inscription sur la liste des variétés à orientation brassicole : taux d'extrait sec, optimisation de l'indice Kolbach, pouvoir diastasique, niveau de viscosité du moût et atténuation limite (c'est-à-dire capacité du moût à fermenter).

Le CTPS tend, au cours des années, à influencer la sélection en modifiant les critères d'inscription et en établissant des systèmes de bonification :

1984, incitation réglementaire à la sélection de variétés tolérantes aux parasites avec la mise en place d'un système de bonus/malus dans la cotation pour l'inscription ;

1985, expérimentation officielle des nouvelles variétés d'orge d'hiver en condition non traitée ou traitée par des fongicides ;

1987, élaboration d'un indice de micromaltage pour l'appréciation de la valeur brassicole des variétés ;

1989, expérimentation officielle des nouvelles variétés d'orge de printemps en condition non traitée ou traitée par des fongicides ;

1997, actualisation de l'indice de micromaltage ;

1999, réévaluation des critères d'inscription et nouvelle classification technologique afin de mieux répondre aux besoins des filières d'utilisation de l'orge.

L'inscription au catalogue officiel français n'est pas la seule étape déterminante dans le développement d'une variété. Ainsi, la variété 'Prisma' (BV Landbouwbureau Wiersum, Pays-Bas), dont l'inscription au catalogue officiel français a été refusée à cause d'une trop grande sensibilité aux maladies, a été imposée par les brasseurs en raison de ses excellentes qualités en brasserie.

Pour en savoir plus

- Ahokas H.**, 1980. Cytoplasmic male sterilities in barley. VII. Nuclear genes for restoration. *Theor. Appl. Genet.*, 57, 193-202.
- Bahrman N., Le Gouis J., Hariri D., Guilbaud L. et Jestin L.**, 1999. Genetic diversity of old French six-rowed winter barley varieties assessed with molecular, biochemical and morphological markers and its relation to BaMMV resistance. *Heredity*, 83 (5), 568-574.
- von Bothmer R., Jacobsen N., Baden C., Jørgensen R.B. et Linde-Laursen I.**, 1991. An eco-geographical study of the genus *Hordeum*. Systematic and ecogeographic studies on crop genepools 7, *Publ. International Board of Plant Genetic Resources*, Rome (I), 127 p.
- Bonjean A.**, 1995. L'orge revisitée. *Biofutur*, 156, 28-32.
- Bonjean A. et Picard E.**, 1991. *Les céréales à pailles, origine – histoire – économie – sélection*. Soft word/ Groupe ITM, Paris, 206 p.
- Boyardieu J.**, 1980. Les orges. Dans : *Les cultures céréalières*. Éditions Hachette, Paris, 188-196.
- Carantino S.**, 1996. Vers une bière idéale. *Biofutur*, 160, 63-65.
- Cauderon Y. et Cauderon A.**, 1951. Un cas d'haploïdie chez l'orge cultivée. *Ann. Amélior. Plant.*, 3, 10-14.
- Cauderon Y. et Cauderon A.**, 1956. Étude de l'hybride F₁ entre *Hordeum bulbosum* L. et *H. secalinum* Schreb. *Ann. Amélior. Plant.*, 3, 307-317.
- Dahleen L.S., Okubara P.A. et Blechl A.E.**, 2001. Transgenic approaches to combat *Fusarium* head blight in wheat and barley. *Crop Sci.*, 41 (3), 628-637.
- Devaux P.**, 1992. Haploidy in Barley and Wheat Improvement. Dans : *Reproductive Biology and Plant Breeding*. Y. Dattée, C. Dumas et A. Gallais, éd., Springer-Verlag, Berlin, 139-151.
- Ellis R.P., Forster B.P., Robinson D., Handley L.L., Gordon D.C., Russell J.R. et Powell W.**, 2000. Wild barley : a source of genes for crop improvement in the XXIst century? *J. Exp. Bot.*, 51 (342), 9-17.
- Jensen J.**, 1991. New high yielding, high lysine mutants in barley. Dans : *Plant Mutation Breeding for Crop Improvement*, Proceedings of a symposium, IAEA et FAO, Vienna, 31-41.
- Jestin L.**, 1992. L'orge. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannetot, éd., INRA Éditions, Paris, 55-70.
- Kasha K.J. et Kao K.N.**, 1970. High frequency haploid production in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Nature*, 225, 874-876.
- Lapierre H. et Signoret P.-A.**, 2004. *Viruses and virus disease of Poaceae* (Gramineae), Coll. Mieux comprendre, INRA Éditions, Paris, 922 p.
- Luciani A.**, 2004. L'orge brassicole. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 115-127.
- McGrath P.F., Vicent J.R., Lei C.H., Pawlowski W.P., Torbert K.A., Gu W., Kaeppler H.F., Wan Y., Lemaux P.G. et Rines H.R.**, 1997. Coat protein-mediated resistance to isolates of barley yellow dwarf in oats and barley. *Eur. J. Plant Pathol.*, 103(8), 695-710.
- Moule C.**, 1980. *L'orge en France*. La Maison rustique, Paris, 156-188.
- Niks R. E., Habekuß A., Bekele B. et Ordon F.**, 2004. A novel major gene on chromosome 6H for resistance of barley against the barley yellow dwarf virus. *Theor. Appl. Genet.*, 109, 1536-1543.
- Pochlman J.M.**, 1979. Breeding Barley and Oats. Dans : *Breeding field crops – second edition*. Avi Publishing Company Inc., Westport, 227-255.
- Roane C.W.**, 1973. Barley. Dans : *Breeding plants for disease resistance. Concepts and applications*. R.R. Nelson, éd., The Pennsylvania State University Press, University Park, 237-252.
- Robbelen G. et Heun M.**, 1991. Genetic analysis of partial resistance against powdery mildew in induced mutants of barley. Dans : *Plant Mutation Breeding for Crop Improvement*. Proceedings of a symposium, IAEA et FAO, Vienna, 93-111.

- Tiers N.**, 2000. Semences : le choix des malteurs fait la loi du marché. *Cultivar*, 497, 14-17.
- Toyoda H.**, 1993. Transformation in *Hordeum vulgare* L. (barley). *Biotechnol. Agric. For.*, 22, 220-233.
- Trottet M. et Le Gouis J.**, 2004. Managing gene for resistance to viruses in *Poaceae*. Dans : *Viruses and virus diseases of Poaceae* (Gramineae), H. Lapierre et P-A. Signoret, éd., Coll. Mieux comprendre, INRA Éditions, Paris, 180-183.
- Waligora C.**, 2000. Protection fongicide : deux traitements maximum. *Cultivar*, 497, 22-24.
- Young E.**, 2000. Production : cultivez la qualité. *Cultivar*, 497, 8-12.

Le pêcher

Prunus persica (L.) Batsch ($2n = 2x = 16$)
(Rosacées)

Présentation de l'espèce

Le pêcher, *Prunus persica* (L.) Batsch, est originaire des montagnes de l'ouest de la Chine. Il est cultivé depuis au moins 4 000 ans av. J.-C. ; des restes archéologiques de cette période ont été trouvés au Zhejiang, à l'est du centre d'origine. La culture du pêcher s'est étendue en Chine depuis le Sud chaud et humide jusqu'au Nord-Est froid et aride, donnant naissance à une très grande diversité génétique. Le pêcher est cité dans le *Livre des Odes*, ouvrage qui rassemble des poésies chinoises écrite du XI^e au VI^e siècle av. J.-C. Fascinés par la douceur et la saveur exquise de son fruit, les Chinois ont créé de nombreuses légendes et superstitions le concernant. Ils attribuent notamment à la pêche le pouvoir de rendre immortel, ou à défaut, d'apporter « mille printemps ».

Par contre, le pêcher semble avoir mis longtemps avant de migrer vers l'ouest. Il ne devait pas être présent dans le nord de l'Inde lors de l'expédition d'Alexandre le Grand, car Théophraste n'en parle pas. Il serait arrivé en Perse par la route de la Soie, au II^e ou au I^{er} siècle av. J.-C., pour passer ensuite en Arménie, puis à Rome. À l'époque de Pline l'Ancien, les Romains cultivaient cinq variétés de pêcher, et lui donnaient le nom de *malum persicum*, soit « pomme de Perse » parce que c'était un gros fruit charnu comme la pomme, et qu'elle venait de Perse.

L'histoire des types de pêche et de leurs noms est complexe, car chacun a été perçu comme un fruit distinct. Le latin *persicum* a donné l'italien *pesca* et le français pêche, que l'anglais a emprunté sous la forme *peach*. Avec l'article arabe *al-*, il a donné l'espagnol *albérichigo* et le français alberge, auberge. Une autre forme espagnole, *prisco*, se retrouve dans le catalan *préssec* et dans diverses formes occitanes : *persec*, *persé*. Sa peau veloutée a donné lieu à une expression familière : « douce comme peau de pêche » et à divers noms dérivés du latin *malum cotoneum*, qui est au départ un nom de coing, mais a été perçu comme désignant un fruit à peau « cotonneuse » : espagnol *melocotón*, qui s'est diffusé

dans le sud-ouest de la France pour désigner surtout des fruits à noyau adhérent : mirlicoton, merlificoton, virecoton, etc.

Le pêcher a peu à peu colonisé l'Occident. En France, le pêcher est cultivé depuis le Moyen Âge et l'apparition de l'espalier entre 1635 et 1650 a contribué à l'amélioration et à l'extension de sa culture. Dans le jardin fruitier du Roi Soleil, à Versailles, il existait déjà une quarantaine de variétés différentes dont les noms évoquaient souvent les charmes féminins : 'Téton de Vénus', 'Belle de Chevreuse', 'Grosse Mignonne', 'Belle de Vitry'. Les Espagnols ont introduit le pêcher au Mexique au XVI^e siècle et les colons européens (espagnols, français, anglais) sur la côte est de l'Amérique du Nord, juste après sa découverte. En France, au XVIII^e siècle, les variétés de pêcher créées à partir de semis ou issues d'introductions sont principalement des variétés donnant des pêches à chair blanche, celles à chair jaune étant alors appelées soit alberges, soit pêches-abricots. Un inventaire et une description des variétés de pêcher furent effectués au XIX^e siècle. En 1856, l'installation de la ligne de chemin de fer reliant Paris, Lyon et Marseille (PLM) a permis l'essor de nouvelles zones de production, notamment en Ardèche et dans la Drôme. Depuis le début du XX^e siècle, l'amélioration du pêcher est assurée essentiellement par les États-Unis dont les variétés (pêcher à fruit jaune) se sont répandues dans le monde entier après la seconde guerre mondiale.

Le génome du pêcher est de petite taille avec environ 0,60 pg d'ADN, soit environ deux fois le génome d'*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. (petite crucifère utilisée comme espèce modèle en génétique).

C'est une espèce pérenne à autogamie préférentielle, avec 5 % de fécondations allogames observées en conditions naturelles. Les autofécondations peuvent être réalisées sans difficulté. Il n'existe pas de système d'incompatibilité pollinique. Néanmoins, une stérilité mâle à contrôle nucléaire a été observée au sein de l'espèce. Le pêcher se multiplie végétativement par greffage, avec comme principaux porte-greffe le pêcher franc ('Chanturgue', 'GF 305'), l'hybride amandier × pêcher 'GF 677' et le prunier 'Ferdor' (cf. fiche p. 639).

La diversité au sein de l'espèce pêcher est très grande. Elle peut se répartir en deux grands groupes comprenant celui des variétés adaptées au climat tempéré à long repos hivernal et celui des variétés adaptées aux conditions subtropicales à faible repos hivernal. Il existe une grande variabilité, disponible parmi de nombreux caractères monogéniques (pilosité de l'épiderme, adhérence du noyau, couleur de la chair, port de l'arbre, ...) et quantitatifs (poids du fruit, précocité de floraison, ...). Toutefois, la variabilité génétique au sein des variétés cultivées est très limitée.

Des prospections ont permis de repérer et d'enrichir les ressources génétiques tant en France qu'à l'étranger. La collection française, qui fait partie du programme ECP/GR (programme coopératif européen pour les ressources phytogénétiques), comprend 160 génotypes composés essentiellement d'anciennes variétés d'origine

française. Elle est en place au Conservatoire botanique national méditerranéen de Porquerolles (Var).

Production et utilisation

Le fruit charnu récolté (pêche, nectarine, pavia ou brugnon) est une drupe indéhiscente dont la ou les graine(s) est (sont) renfermée(s) dans une coque ligneuse (noyau) située au centre du fruit. Cette drupe provient de la transformation d'un ovaire monocarpellé contenant deux ovules.

La production mondiale de pêches et de nectarines est d'environ 15 millions de tonnes. Les premiers producteurs sont la Chine (5,8 millions de tonnes), l'Italie (1,7 million de tonnes), les États-Unis (1,4 million de tonnes) et l'Espagne (0,9 million de tonnes). La production française est de 387 000 tonnes (données FAO, 2004).

Chez le pêcher, quatre types de fruit sont distingués selon la pilosité de l'épiderme, la fermeté de la chair et son adhérence au noyau :

- la pêche proprement dite, à peau duveteuse, chair fondante et noyau libre ;
- la nectarine, à peau lisse, chair fondante et noyau libre, communément appelée brugnon sur les marchés ;
- le brugnon, à peau lisse, chair fondante et noyau adhérent ;
- la pavia, à peau duveteuse, chair non fondante et à noyau adhérent.

De manière générale, on trouve dans chacun de ces groupes des fruits de forme sphérique ou plate dont la chair blanche, jaune ou sanguine peut être de saveur douce ou acidulée.

La pêche est un fruit de table qui se consomme en frais de début-juin à fin-septembre (pêche, nectarine et brugnon). Elle est fort appréciée en desserts froids ou chauds (sorbet, pêche flambée, ...), tandis que la pavia sert de base à plusieurs préparations industrielles telles que les fruits au sirop, les compotes, les jus et nectars ou les confitures.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Les variétés anciennes de pêcher étaient adaptées à une production localisée dans les jardins proches des grandes villes dont ils assuraient l'approvisionnement. Suivant les régions, la sélection pratiquée de façon empirique (semis libres) donnait des variétés adaptées à diverses conditions de climat et de sol. Ce fut en particulier le cas au XVII^e siècle en Région parisienne avec des obtentions comme '**Belle de Chevreuse**', '**Belle de Vitry**' ou '**Hâtive de Ferrières**'. On peut également citer les nombreuses variétés ayant vu le jour à Montreuil-sous-Bois (Seine-Saint-Denis) comme '**Belle Beausse**' (XVIII^e siècle, J. Beausse dit La Brette), '**Grosse Mignonne Hâtive**' (1820, Dubarle) ou '**La France**' (1887,

Bousset). Ces variétés de pêcher menées le plus souvent en espalier (basse tige) à l'ados d'un mur blanc donnaient de faibles rendements. Elles produisaient des fruits à chair blanche de petit calibre, peu colorés et fragiles. La culture en plein vent (haute tige) avec les pavies à chair jaune était plutôt localisée dans le Sud. Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, l'établissement de la ligne ferroviaire PLM et l'introduction des États-Unis de variétés très précoces telles que '**Précoce de Hale**' (1850, Ohio), '**Alexander**' (1867, Illinois) ou '**Amsden**' (1865, Missouri) conduisirent au déplacement des principales zones de culture vers le sud du pays (Drôme, Isère, Ardèche). C'est ainsi qu'aux débuts des années 1900, de nouvelles régions de production comme la vallée de l'Eyrieux (Ardèche) devinrent célèbres et prospères pour leur culture intensive du pêcher.

Variétés récentes

La sélection moderne du pêcher a débuté aux États-Unis dès le XIX^e siècle. '**Chinese Cling**' a été introduite de Shanghai (Chine) en Angleterre par Robert Fortune en 1844. Bien que ce soit une variété de pavier à chair blanche, elle a servi de géniteur à la plupart des variétés contemporaines. Après '**Elberta**' (1879, Géorgie) et '**J.H. Hale**' (1912, Connecticut), qui étaient des semis de hasard, un programme de recherche mené à South Haven dans le Michigan, a donné la série des '**Haven**', dont '**Redhaven**' (1940) issu du croisement 'Hale-haven' × 'Kalhaven'.

En France, c'est à partir des années 1930 que l'intensification des vergers de pêcher se met en place en corollaire à « l'invasion des variétés nord-américaines » provenant de programmes d'hybridations contrôlées. Cette situation s'amplifia au lendemain de la seconde guerre mondiale pour répondre aux besoins d'une arboriculture moderne orientée résolument vers une culture commerciale standardisée. La culture du pêcher est désormais entièrement rénovée et les grandes régions de production se localisent aujourd'hui exclusivement au sud de la Loire, en Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Midi-Pyrénées, et plus modestement en Aquitaine. De juin à septembre, une large gamme variétale est aujourd'hui disponible dans tous les types de fruits avec des innovations récentes comme les nectarines plates ('**Mesembrine**', '**Oriola**') ou les nectarines sanguines ('**Monec**', '**Monif**' '**Monof**').

Ci-après est indiquée l'année d'inscription au catalogue officiel français. Le calibre des pêches est standardisé suivant leurs diamètres symbolisés par une lettre : D : 51mm < Ø < 56mm ; C : 56mm < Ø < 61mm ; B : 61mm < Ø < 67mm ; A : 67mm < Ø < 73mm et AA : 73mm < Ø < 80 mm.

Les variétés sont classées selon le type de fruit produit.

Pêche

1961, '**Redhaven**' (Station expérimentale de South Haven, Michigan, États-Unis), variété de saison (maturité à la mi-juillet en Languedoc) produisant une pêche à chair jaune, de bon calibre régulier, bien colorée, ferme et d'excellente qualité gustative. 'Redhaven' a révolutionné la culture du pêcher dans le monde entier. Abondamment plantée dans les vergers commerciaux et les jardins d'amateurs, elle fut longtemps la variété de référence citée dans tous les ouvrages sur le pêcher. Toutes époques confondues, c'est la variété de pêcher la plus connue.

1961, '**Redwing**' (Lammerts, Californie, États-Unis), excellente variété produisant une pêche à chair blanche semi-précoce (maturité pendant la première quinzaine de juillet en Languedoc), juteuse et fondante, mais sensible à la bactériose et à floraison précoce. Cette variété très plantée dans les années 1980 est à l'origine de nombreuses sélections à chair douce. Son caractère « fruit doux » provient de géniteurs chinois *peento* (fruit plat), à faible repos hivernal ayant notamment donné la variété 'Babcock'.

1961, '**Springtime**' (Armstrong Nurseries Inc., Californie, États-Unis), variété produisant une pêche à chair blanche, précoce (maturité début juin en Languedoc), très parfumée, qui, malgré une floraison précoce, a remplacé 'May Flower' dans toutes les zones de production jusqu'à la fin des années 1980. Elle est issue du croisement ('Luken's Honey' × 'July Elberta') × 'Robin'. À réserver aux zones les plus ensoleillées, elle demande une taille sur gros rameaux mixtes et un fort éclaircissage pour obtenir un calibre correct (B dominant).

1966, '**Redtop**' (USDA, Californie, États-Unis), variété produisant une pêche à chair jaune de saison (maturité mi-juillet en Languedoc) issue du croisement de 'Sunhigh' par un semis libre de 'July Elberta'. Productive, de belle présentation et appréciée du commerce, cette variété a été très plantée dans les années 1970 pour ces caractéristiques remarquables à son époque de maturité. Dans le même créneau et du même hybrideur (J. Weinberger), on trouve d'autres grandes variétés comme 'Flavorcrest', 'Fairtime', 'Flamecrest', 'Coronet', 'Fayette', 'Suncrest' ou la très célèbre 'Dixired'.

1971, '**Genadix 4**' (INRA, France) variété produisant une pêche à chair blanche. Elle est issue du croisement entre l'ancienne variété française dénommée 'Génard' produisant une pêche à chair blanche et la variété d'origine nord-américaine 'Dixired' produisant une pêche à chair jaune. Peu colorée et de fermeté moyenne, elle était surtout réputée pour son excellente qualité gustative et sa rusticité (floraison tardive). Elle est aujourd'hui recommandée dans les catalogues pour les jardiniers amateurs.

1971, '**Michelini**' (A. Michelini, Italie), variété tardive (maturité à la fin d'août), d'origine italienne (semis de hasard), produisant une pêche à chair blanche de gros calibre, de forme arrondie, régulière et à la coloration épidermique légèrement rouge rosé sur fond crème. C'est une variété rustique (très

régulière en production), de présentation moyenne (taille d'été indispensable), mais de bonne qualité gustative et à fort potentiel de charge. Elle a été très cultivée dans les années 1980.

1972, **'Springcrest'** (USDA, Géorgie, États-Unis), variété précoce (maturité à la mi-juin en Languedoc) produisant une pêche à chair jaune, peu sensible à la fente du noyau, issue du croisement entre 'FV9-170' et 'Springtime'. Révolutionnaire à son époque de lancement, cette variété a dominé le marché de la pêche précoce pendant vingt ans avec des qualités d'ensemble exceptionnelles : calibre, attrait, fermeté et facilité de récolte. 'Springcrest' a également été une source majeure de nouvelles variétés en tant que parent direct en croisement ('Crimson Lady') ou par mutation spontanée ('Ray Crest', 'Maycrest', 'Starcrest').

1975, **'Mercil'** (Grant Merrill, Californie, États-Unis), variété produisant une pêche à chair jaune, à maturité tardive (deuxième quinzaine d'août en Languedoc). Le fruit, de belle présentation et de fort calibre, est ferme et d'excellente qualité gustative. Cette variété est commercialisée sous la marque O'Henry®. C'est une variété de référence pour son époque de maturité, largement utilisée par de nombreux hybrideurs ces vingt dernières années et encore aujourd'hui fortement représentée dans les vergers.

1981, **'Merspri'** (Grant Merrill, Californie, États-Unis), variété précoce (maturité mi-juin en Languedoc) produisant une pêche à chair jaune. Pour les producteurs de pêche, c'est une référence et la première variété réellement intéressante de la saison, notamment pour son fort potentiel de calibre et de production. Régulière, bonne et de belle présentation, elle est parmi les variétés à pêche jaune les plus cultivées aujourd'hui, largement implantée dans tous les bassins de production. L'arbre a tendance à se dégarnir avec l'âge. Cette variété est commercialisée sous la marque Spring Lady®.

1987, **'Zaifer'** (Zaiger Floyd, Californie, États-Unis), variété produisant une pêche à chair jaune de début juillet. À l'époque de son lancement, avec un potentiel de calibre et de production remarquable, elle a fait l'objet de plantations massives. C'est la première sélection de cet obtenteur ayant eu un réel impact en nombre d'hectares sur le verger français de pêcher. Excessivement plantée, ses principaux défauts résident dans la difficulté à optimiser la date de récolte due à une très forte coloration des fruits et son port trop érigé qui rend l'arbre difficile à former. Cette variété est commercialisée sous la marque Royal Glory®.

1990, **'Ferjalou'** (INRA, France), variété de saison (maturité pendant la deuxième quinzaine de juillet en Languedoc) produisant une pêche plate à chair jaune. Réputée pour son excellente qualité gustative, c'est la première variété produisant un fruit plat, inscrite au catalogue officiel. Cette variété est commercialisée sous la marque Jalousia®.

1990, '**Meydicte**' (Pépinières Meynaud Frères, France), variété de saison (maturité à la fin de juillet en Languedoc) produisant une pêche à chair blanche. Le fruit est attrayant, d'un gros calibre, de forme ronde et régulière avec une coloration rouge grenat à rouge rosé intense (80 à 90 % de la surface). L'arbre est facile à conduire. À une époque de maturité très chargée en pêches blanches, c'est une variété à classer parmi les meilleures sur le plan gustatif. Cette variété est commercialisée sous la marque **Benedicte**®.

1990, '**Moncav**' (Sca de Valigne, France), variété de saison (maturité à la mi-août en Languedoc) produisant une pêche à chair blanche de saveur douce à fort potentiel de calibre et de production. Cette variété est commercialisée sous la marque **Opale**®. Fort appréciée des producteurs, elle fait aujourd'hui partie, en France, des quatre premières variétés les plus cultivées en pêche blanche avec '**Zaifuro**', '**Zainara**' et '**Zaitabi**' commercialisées respectivement sous les noms de marques **Fidelia**®, **Alexandra**® et **Gladys**®.

1991, '**Rich Lady**' (Zaiger Floyd, Californie, États-Unis), variété de début de saison (maturité pendant la première semaine de juillet en Languedoc) produisant une pêche à chair jaune, de bonne saveur, à la présentation exceptionnelle (forme régulière, calibre A-AA dominants), épiderme rouge foncé à rouge lumineux sur 80 à 100 % de la surface du fruit), très appréciée du négoce. L'arbre est cependant délicat à conduire et la date de récolte optimale difficile à apprécier, en raison de la très forte coloration du fruit.

1992, '**Summer Rich**' (Zaiger Floyd, Californie, États-Unis), variété produisant une pêche à chair jaune de saison (mi-juillet en Languedoc) dont la présentation et les qualités d'ensemble du fruit, ainsi que les caractéristiques générales de l'arbre sont proches des variétés de la série des « Rich » : '**Zainoar**', '**Zairiala**', '**Zainobe**' et '**Zairisup**' commercialisées respectivement sous les noms de marques **Rubirich**®, **Earlirich**®, **Vista Rich**® et **Super Rich**®.

1998, '**Caprice**' (INRA, France), variété rustique (maturité au début de juillet) produisant une pêche à chair blanche, à la présentation attrayante, de bon calibre et d'excellente qualité gustative (bon équilibre sucres/acides). Elle se montre productive en toutes régions de production.

Nectarine

1968, '**Fuzalode**' (INRA, France), variété produisant une nectarine à chair blanche dont l'époque de maturité se situe vers la mi-juillet en Languedoc, recommandée pour son excellente qualité gustative et une très belle présentation. Elle a été rapidement supplantée par des variétés plus fermes, de calibre supérieur et moins sensibles au gel sur fleurs. C'est aujourd'hui une variété pour jardiniers amateurs.

1972, '**Armking**' (Armstrong Nurseries Inc., Californie, États-Unis), variété précoce (maturité à la mi-juin en Languedoc), produisant une nectarine à chair jaune, de gros calibre pour son époque de maturité. Elle est issue de l'autofécon-

dation de 'Palomar' × 'Springtime'. Malgré un fruit à mucron (c'est-à-dire la pointe pistillaire) proéminent la rendant fragile aux manipulations et de piètres qualités gustatives, elle a longtemps fait l'objet de plantations relativement importantes.

1975, '**Andrea**' (F.W. Anderson, Californie, États-Unis), variété produisant une nectarine à chair jaune de saison (deuxième quinzaine de juillet en Languedoc), issue du croisement 'Late Le Grand' × 'Early Sungrand'. Cette variété de référence est commercialisée sous la marque Summer Grand®. Peu sensible au gel sur fleurs et très floribonde, elle montre une bonne régularité de production. Son fruit de couleur rouge orangé et de belle présentation a d'excellentes qualités gustatives. Provenant du même hybrideur, on peut citer d'autres grandes variétés de nectarines jaunes des années 1970 comme 'Le Grand', 'Sun Grand', 'May Grand', 'Early Sun Grand', 'Red June', 'Aurelio Grand', 'Spring Red' ou 'Red Diamond'. Elles ont toutes contribué à l'essor du verger moderne de nectarines.

1975, '**Fantasia**' (USDA, Californie, États-Unis), variété produisant une nectarine à chair jaune de saison (fin juillet en Languedoc), issue du croisement de 'Gold King' par un semis libre de 'Red King'. C'est une bonne variété de référence, très plantée dans toutes les régions de production pour sa rusticité. Encore présente dans les vergers, elle a occupé une grosse part du marché des nectarines jaunes dans les années 1980. Parmi les obtentions importantes du même hybrideur en matière de nectarines jaunes, il convient aussi de mentionner 'Fairlane', 'Firebrite', 'Flamekist', 'Independence' et 'Flavortop'.

1979, '**Snowqueen**' (Armstrong Nurseries Inc., Californie, États-Unis), variété produisant une nectarine à chair blanche précoce (mûre fin juin en Languedoc), très plantée dans toutes les régions de production durant les années 1980 et unanimement reconnue pour ses qualités gustatives. Elle a marqué son époque et demeurera dans les mémoires comme la première grande variété de nectarine à chair blanche. Excessivement plantée dans les années 1980, elle représente encore aujourd'hui un gros volume de production, même si elle est de nos jours dépréciée pour sa sensibilité aux fissures épidermiques (*cracking*).

1992, '**Monnude**' (Monteux-Caillet René, France), variété de saison (maturité à la mi-juillet en Languedoc) produisant une nectarine à chair blanche, de belle présentation et de bonne qualité gustative (saveur douce). Avec un fort potentiel de calibre (A-AA dominants) et de production, elle s'est très vite imposée à son époque de maturité et a fait l'objet de fortes plantations dans toutes les zones de production. C'est aujourd'hui une variété de référence. Cette variété est commercialisée sous la marque Emerald®.

1992, '**Monphir**' (Monteux-Caillet René, France), variété de mi-saison (maturité au début d'août en Languedoc) produisant une nectarine à chair blanche, présentant de bonnes qualités gustatives (saveur douce) associées à une belle présentation et un fort potentiel de calibre (A-AA dominants) et de production (facile à conduire). Avec 'Monnude', 'Momee' et 'Monnaze', c'est l'un des plus

importants succès de cet hybrideur français dans la gamme des nectarines blanches, avec un niveau de plantation remarquable au plan national, proche de celui de 'Snowqueen'. Cette variété est commercialisée sous la marque Zephyr®.

1992, '**Nectaross**' (Istituto Sperimentale per la Frutticoltura, Italie), variété de saison (maturité au début d'août en Languedoc) produisant une nectarine à chair jaune dont la présentation, le calibre (AA-A dominants) et les qualités gustatives sont supérieures à la variété de référence 'Fantasia'. Bien implantée en France comme en Italie pour ses qualités d'ensemble alliant facilité de conduite, mise à fruit rapide et intense et très fort potentiel de calibre quelle que soit la charge des arbres. Du même institut, on peut citer les très intéressantes variétés 'Orion' et 'Venus'.

1993, '**Momee**' (Monteux-Caillet René, France), variété demi-précoce (maturité à la fin de juin en Languedoc) produisant une nectarine à chair blanche, de texture fine, très juteuse et à la saveur douce très légèrement acidulée. C'est une variété plutôt rustique avec un bon potentiel de production et un fruit de calibre (A dominant homogène) et de présentation (rouge foncé lumineux sur fond blanc crème, absence de fissures épidermiques) supérieur à celui de 'Snowqueen'. Cette variété est commercialisée sous la marque Jade®.

Brugnon

1989, '**Zaitabo**' (Zaiger Floyd, Californie, États-Unis), variété produisant un brugnon à chair jaune de saveur douce (maturité début juillet) à la présentation, au calibre (AA dominant) et au potentiel de production exceptionnels. Tous types confondus (pêches/brugnons/nectarines), c'est la variété des années 1990 la plus largement plantée au niveau national. Elle représente donc aujourd'hui une référence variétale incontournable et appréciée de la filière. Ses qualités gustatives peuvent cependant être pénalisées par une récolte anticipée. Cette variété est commercialisée sous la marque Big Top®.

1996, '**Diamond Ray**' (Bradford Nursery, Californie, États-Unis), variété de début de saison (maturité pendant la première quinzaine de juillet en Languedoc) produisant un brugnon à chair jaune remarquable pour l'attrait, la tenue sur l'arbre (épiderme relativement épais, chair ferme) et la qualité gustative de ses fruits de saveur acidulée. Bien que d'introduction récente, c'est l'une des variétés de nectarines jaunes les plus plantées dans son créneau de maturité (12 jours après 'Zaitabo') dans tous les bassins de production.

2001, '**Maillara**' (Arsène Maillard, France) variété précoce (maturité à la mi-juin en Languedoc) produisant un brugnon à chair jaune, de très bon calibre et d'excellente qualité gustative pour son époque de maturité (se situant cinq jours après celle d'Armking'). C'est l'une des meilleures obtentions de cet hybrideur français dont les nombreuses sélections, toutes gammes de fruits confondues, pèsent de plus en plus dans les programmes de plantations des producteurs, tant en France qu'à l'étranger. Cette variété est commercialisée sous la marque Big Bang®.

Pavie

1966, **'Babygold' 5, 6, 7, 8** et 1968, **'Babygold' 9** (Station expérimentale de New Brunswick, New Jersey, États-Unis), variétés produisant des pavies à chair jaune destinées à la mise en conserve. Cette série de variétés (maturité début août à septembre) a relancé la culture de ce type de production dans les années 1960/70 avec des qualités agronomiques (rusticité, production, calibre) et technologiques (aptitude à la transformation) exceptionnelles pour l'époque.

1989, **'Andross'** (Station expérimentale de Davis, Californie, États-Unis), variété issue du croisement 'Dix 7A-1' × 'Fortuna' produisant une pavie dont l'époque de maturité se situe vers la mi-août, très proche de la variété 'Sudanell' (variété population issue de semis et sélectionnée en Espagne dans la région de Lleida) qu'elle a très avantageusement remplacée dans toutes les grandes zones de production. Son fruit de gros calibre et à la couleur jaune orangé possède une chair de texture juteuse très parfumée.

2001, **'Fergold', 'Fercluse', 'Fergaron', 'Ferpeo', 'Feraude', 'Ferlot'** (INRA, France), variétés nouvelles de pavies offrant une gamme homogène de maturité de fin juillet à début septembre et répondant aux attentes des industriels : mise à fruit rapide et régularité de production (rusticité), maturités en août-septembre pour la réalisation de macédoines de fruits en direct (sans reprise de fabrication), excellentes qualités gustatives, fruits ronds de calibre A dominant (150 à 160 g) et très fort potentiel de production. Ce programme de sélection a bénéficié d'une collaboration étroite avec Conserve Gard qui a participé au choix final (mise en place de vergers précommerciaux et tests technologiques).

Remarque. Depuis de nombreuses années, la création variétale chez le pêcher est très active, tant en France qu'à l'étranger. Il en résulte un grand nombre de variétés multipliées chaque année par les pépiniéristes-éditeurs. Cependant, la base génétique utilisée est relativement réduite et principalement constituée de géniteurs très apparentés, pour la plupart originaires des programmes de sélection américains du début du XX^e siècle.

Regard sur 50 ans de sélection

Au cours des cinquante dernières années, l'amélioration variétale du pêcher a été largement dominée par les États-Unis, avec pour cibles principales les caractéristiques du fruit (calibre, coloration, fermeté) et la productivité. En France, une collection importante de pêcheurs notamment fut constituée à partir de 1934 par la Station de Recherches viticoles, d'Arboriculture fruitière et d'Alertes agricoles de Bordeaux, mais ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale, avec la création de l'INRA (en 1946), qu'ont été engagés les premiers programmes d'amélioration du pêcher selon la méthode classique d'hybridation intraspécifique. Cependant, à partir des années 1960, l'Institut s'est orienté davantage vers des études génétiques et la méthodologie de l'amélioration de cette espèce.

Il a notamment développé des variétés innovantes présentant des caractères mendéliens originaux, tels que les pêches plates, les fruits non acides, les pêches sanguines, la résistance au puceron vert, le port pleureur, etc. Depuis une dizaine d'années, ces programmes et d'autres plus classiques, sont poursuivis en complémentarité avec des entreprises privées françaises de sélection (Monteux-Caillet René, Agro-Selection-Fruit, Pépinières Valla Georges) dont le poids en matière d'obtention variétale devient important. Peu nombreuses jusqu'à la fin des années 1980, ces obtentions variétales représentent aujourd'hui environ 50 % des demandes d'inscription au catalogue officiel et couvrent une large part des plantations de pêchers mises en place au niveau national dans tous les bassins de production.

Les méthodes de sélection les plus utilisées sont actuellement les hybridations contrôlées. Les autofécondations et les semis de hasard sont de moins en moins employés.

Élargissement du calendrier de production. Il s'est considérablement étendu ces vingt dernières années, avec une production s'étalant aujourd'hui de fin mai à pratiquement fin septembre. Les variétés précoces ont particulièrement bénéficié de cet effort de sélection. Une gamme nouvelle de variétés de pêchers pavies rustiques et productives, répondant aux besoins des industriels de la conserve, est également aujourd'hui disponible.

Développement d'une large gamme de fruit à chair douce (fruit doux : faible acidité). Utilisée au départ pour améliorer la qualité gustative des pêches dans le créneau de maturité des précoces, on retrouve aujourd'hui ce type de saveur en toutes saisons et dans toutes les gammes de fruits. Pour une plus grande satisfaction des consommateurs, une meilleure identification à l'étalage de ce type de variétés s'avère aujourd'hui nécessaire.

Diversification et innovation variétale. Au sein de cette espèce, de nombreuses mutations spontanées (chair blanche/jaune, épiderme duveteux/lisse, chair douce/acide ...) ont été développées par les sélectionneurs et largement adoptées par la filière, contribuant ainsi à une forte segmentation de l'offre variétale. Celle-ci tend encore à s'accroître avec l'arrivée de fruits nouveaux comme les nectarines plates et les nectarines sanguines.

Amélioration du fruit (calibre, coloration et fermeté). Ces dernières années, l'amélioration chez le pêcher a surtout porté sur les caractéristiques de production et d'aspect du fruit. Les variétés de pêches actuelles présentent un fort potentiel de production (supérieur à 50 tonnes/ha en saison) et de calibre (A, AA), de bonnes aptitudes aux manipulations (chair ferme) et une présentation d'ensemble uniforme (forte coloration rouge rosé à rouge grenat plus ou moins lumineuse), associée à une diversité de saveur très large (chairs très douces à très acidulées).

La qualité gustative des pêches

Largement prise en compte par l'ensemble des sélectionneurs, c'est une contrainte majeure pour la filière. Il convient cependant de préciser que « la qualité gustative » demeure une caractéristique difficile à contrôler, car elle est fortement liée à la perception que l'on se fait d'un fruit. Il devient dès lors compliqué de réaliser une mesure objective (arômes : que mesurer ?) et l'expérimentateur doit finalement faire appel à des jurys d'experts entraînés pour définir, par exemple, le profil sensoriel d'une variété ou réaliser des tests hédoniques pour mesurer le degré de satisfaction des consommateurs. Pour ceux-ci, la valeur d'une caractéristique est de plus souvent subjective (ex : fruit doux apprécié à des degrés divers). Et pour le sélectionneur, l'objectif consiste généralement à optimiser la valeur d'un critère plutôt qu'à la maximiser (calibre, équilibre sucre/acide, fermeté, ...).

Les qualités gustatives intrinsèques des fruits d'une variété ne sont ensuite pas toujours restituées au consommateur du fait de la forte influence du milieu (aléas climatiques, techniques culturales, conditions et délais de mise en marché), et parce qu'il est d'autre part de plus en plus délicat pour l'arboriculteur d'apprécier la phase de maturité à la cueillette (fruit très coloré trop précocement). Il en résulte ainsi des fruits souvent peu goûteux et trop fermes, alors que le consommateur souhaite les déguster plutôt en sur-maturité (chair fondante).

Pour mieux répondre à cette exigence de qualité, une charte fruitière a été mise en place au niveau national. Elle régit notamment l'expérimentation variétale en verger de comportement qui a pour objectif d'évaluer le potentiel agronomique des nouvelles variétés et de définir le meilleur itinéraire technique pour chacune d'elles (formes, densité de plantation, taille, éclaircissage, protection phytosanitaire, récolte). La gestion après récolte est également abordée (agréage, entreposage au froid, conditionnement, affinage, préparation des lots) afin de mieux savoir gérer le potentiel de qualité de chaque variété jusqu'au consommateur final. Enfin, des accords interprofessionnels sont signés visant en partie à éliminer la « non-qualité », comme, par exemple, celui interdisant la vente des fruits de calibre D.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Beaucoup de caractères importants sont monogéniques chez le pêcher : port compact ou pleureur de l'arbre, forme plate du fruit, chair douce (absence d'acidité), chair de type pavie, épiderme glabre (nectarine), couleur de la chair jaune ou blanche (caroténoïdes), chair sanguine (présence d'anthocyanes), noyau adhérent, ... Cette variabilité se retrouve dans les espèces et formes sauvages en Chine.
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI à l'étranger 'Magnif 135' (Argentine, 1968) et 'Plovdiv 6' (Bulgarie, 1981) sont deux variétés qui ont été obtenues par mutagenèse aux rayons γ et qui se distinguent respectivement par le calibre du fruit et le rendement.

suite...

... suite

Croisements interspécifiques	OUI en France Des croisements avec <i>P. davidiana</i> Carr. Franch. ont été effectués dans le but de cumuler des gènes de résistances aux bio-agresseurs suivants : – <i>Sphaerotheca pannosa</i> var. <i>persicae</i> (Wallr.) Lev, agent de l'oïdium ; – <i>Taphrina deformans</i> (Berk.) Tul. var. <i>persicae</i>, agent de la cloque du pêcher ; – le puceron vert, <i>Myzus persicae</i> Sulzer ; – le virus de la variole des <i>Prunus</i> (PPV), induisant la maladie de la sharka. Mais, il n'y a pas eu encore de sortie variétale.
	OUI à l'étranger Notamment <i>P. ferganensis</i> (Kost. & Riab) Kov. & Kost (Italie, ISF Rome)
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	AUCUNE La transgénèse a été réalisée pour la première fois chez le pêcher en 1994, mais elle n'est « maîtrisée » qu'à partir d'embryons immatures.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Le greffage permet de multiplier les clones pour la diffusion d'une variété. La culture <i>in vitro</i> d'embryons immatures (de fin mai à mi-juillet) a permis l'élargissement de la gamme variétale vers le type de maturité précoce. La multiplication végétative <i>in vitro</i> est utilisée quelquefois comme aide au marcottage (amélioration de la faculté d'enracinement).
Sélection sanitaire	OUI La thérapie est utilisée pour l'obtention de clones sains, indemnes de virus. Mais, cette technique peut avoir des « effets défavorables » (végétation trop exubérante, diminution du calibre, de la coloration et de la fermeté du fruit). Ces effets sont particulièrement marqués chez les variétés précoces si l'on applique des itinéraires techniques identiques à ceux employés pour les variétés « virosées » et donc moins vigoureuses.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	OUI Il existe des stérilités mâles nucléaires (exemple : stérilité de type « J.H. Hale »), mais elles sont très peu utilisées pour créer des variétés.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE

suite...

... suite

Marquage moléculaire	OUI Des cartes génétiques intégrant des caractères mendéliens et comportant plus de 200 marqueurs sont disponibles avec des QTLs, notamment de : – résistance à la cloque, à l'oïdium, au puceron vert, à la maladie de la sharka ; – date de floraison, maturité et poids du fruit ; – teneur en acides citrique, malique et quinique ; – teneur en saccharose, glucose, fructose et sorbitol. Un jeu de marqueurs a été sélectionné pour établir les cartes d'identité de variétés afin de pouvoir mieux les identifier au stade juvénile.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Des croisements intraspécifiques sont réalisés et une sélection est effectuée dans les hybrides obtenus, qui sont plantés sur leurs propres racines. Les hybrides les plus intéressants sont, après greffage, évalués en essais comparatifs, puis multipliés.
Types variétaux	Variété clone Les variétés sont des clones issus : – de semis de hasard ('Granbo Early') ; – d'autofécondations ('Babiolo') ; – ou de croisements contrôlés ('Genadix 7').

Perspectives d'amélioration

Si l'avenir de la culture du pêcher en France est conditionné en partie par la recherche d'une meilleure rentabilité économique (diminution des intrants, maîtrise des coûts de production), il s'inscrit aussi dans une politique de développement durable basée sur une agriculture plus respectueuse de l'environnement, une limitation des risques sanitaires (virus, bactéries, parasites fongiques) et l'innovation variétale (obtention de gammes nouvelles d'excellente qualité gustative et résistantes aux bio-agresseurs). En effet, une érosion drastique de la variabilité génétique au sein de l'espèce se traduit par l'uniformisation des fruits à l'étalage pour le consommateur, une forte sensibilité à un grand nombre de parasites et ravageurs pour le producteur et une limitation potentielle d'obtention de produits nouveaux pour le sélectionneur. Quelques programmes visant à élargir cette base génétique étroite sont en cours, avec notamment, le recours à des variétés anciennes autochtones (France, Espagne, Italie, etc.) et à des espèces sauvages proches du pêcher.

Caractères à améliorer

Qualité gustative. Les progrès rapides relatifs à la connaissance du génome et de la régulation de son expression permettent aujourd'hui une intégration des connaissances acquises dans des modèles capables de reproduire la variabilité génétique issue de croisements entre génotypes différents et de simuler le fonction-

nement du fruit, au sens de l'élaboration de la qualité, sous le triple contrôle du génome, de la plante et de l'environnement physique. Dans ce sens, une démarche novatrice de sélection variétale appliquée à l'élaboration de la qualité organoleptique de la pêche a été engagée par le couplage de modèles éco-physiologiques (croissance et qualité du fruit) et génétiques (analyse de QTLs et cartographie) qui prennent en compte les interactions génotype/milieu.

Résistance aux bio-agresseurs. Cet objectif d'amélioration a été peu travaillé au niveau international et les variétés permettant une réduction significative des traitements pesticides font défaut chez le pêcher. Cette espèce est pourtant sensible à de nombreux parasites (des champignons, en particulier *Taphrina deformans* var. *persicae* agent de l'oïdium, *Sphaerotheca pannosa* var. *persica* agent de la cloque du pêcher et *Monilinia laxa* agent de la moniliose) et ravageurs (puceron vert, tordeuse orientale du pêcher (*Cydia molesta*)) qui obligent l'arboriculteur à de multiples interventions phytosanitaires, voire à l'arrachage d'arbres en cas de présence du virus de la variole des *Prunus* ou de la bactérie *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*). L'introduction de résistances génétiques s'avère donc une perspective souhaitable, afin de sécuriser le rendement et développer des méthodes de lutte alternative plus respectueuses du milieu et de la santé des consommateurs.

L'exploitation conjointe de résistances monogéniques fortes au puceron vert et à l'oïdium et l'introgession des facteurs de résistance issus d'une espèce sauvage (*Prunus davidiana*) apparentée au pêcher, qui possède des résistances polygéniques vis-à-vis des principaux parasites et ravageurs de la culture en France, sont en cours. Le marquage moléculaire est intégré dans ces programmes de sélection.

Facilité de conduite. C'est une caractéristique complexe encore peu prise en compte par les sélectionneurs malgré une variabilité génétique disponible importante (port des arbres, qualité des rameaux porteurs) et l'intérêt de plus en plus fort dans le contexte économique actuel (marges réduites) de diminuer les charges de production par une réduction des temps de travaux au verger (taille, éclaircissage).

Techniques à développer

Suite au développement de cartes génétiques chez le pêcher et les espèces apparentées, le marquage moléculaire commence à s'intégrer dans les programmes d'amélioration, en particulier pour la résistance aux bio-agresseurs et la qualité du fruit. Toutefois, aucune variété ne résulte encore de sélection assistée par marqueurs.

Dans ce but, la France participe à un consortium international pour le développement d'outils moléculaires tels que *Expressed Sequence Tags* (EST) et la carte physique. Le pêcher est choisi comme l'espèce modèle des rosacées ligneuses, en raison de la colinéarité des génomes au sein du genre *Prunus* L. et de la petite taille de son génome.

Inscription et protection des variétés en France

1953, ouverture du catalogue officiel des espèces et variétés arbres fruitiers.

1967, modification, par arrêté ministériel : classes I et II de la rubrique particulière variétés d'arbres fruitiers.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de plantes fruitières destinées à l'exportation.

1979, définitions de deux rubriques (rubrique I : variétés en cours d'expérimentation et rubrique II : variétés confirmées après expérimentation).

1984, création de deux commissions :

- la Commission catalogue (CC), qui s'appuie sur les travaux des commissions techniques, chargées d'instruire les demandes d'inscription et de suivre l'expérimentation des variétés et porte-greffe ;
- la Commission permanente de certification (CPC), qui a pour mission de gérer et de coordonner les opérations de certification à la fois sur le plan technique, administratif et financier.

1994, obligation d'inscription au catalogue officiel pour les variétés certifiées.

En 2003, 348 variétés de pêcher étaient inscrites au catalogue officiel français. Les variétés sont inscrites pour 10 ans et sont réinscriptibles par période de 5 ans. Il n'existe pas de catalogue européen pour les espèces fruitières. Dans les études DHS réalisées par l'INRA pour le compte du CTPS, du CPOV ou de l'OCVV, 69 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 cycles de production significative de fruits. À l'issue de cet examen, au moment de l'inscription, une fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie pour les variétés présentant un caractère de nouveauté et d'authenticité, ainsi qu'un bon état sanitaire (absence de maladie de dégénérescence). Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet par la suite de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des pays de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des plants. C'est le Ctifl qui en a la responsabilité, par délégation du ministère de Tutelle. L'inscription au catalogue officiel des espèces et variétés est obligatoire pour que la variété puisse entrer dans le système de certification. En 2004-2005, 134 variétés et 153 000 plants ont été certifiés. L'intégration d'un contrat spécifique de greffage à œil dormant dans le règlement de certification devrait encore augmenter les capacités de production de plants certifiés dans les toutes prochaines années.

Pour en savoir plus

Site internet de la carte physique du pêcher : <http://www.genome.clemson.edu/gdr/>

Caillavet H. et Souty J., 1950. *Monographie des principales variétés de pêcher*. La Maison rustique, Librairie de l'Académie de l'Agriculture, Paris, 416 p.

Chaparro J.X., Werner D.J., O'Malley D. et Sederoff R.R., 1994. Targetted mapping and linkage analysis of morphological, isozyme and RAPD markers in peach. *Theor. Appl. Genet.*, 87, 805-815.

Decroocq V., Foulongne M., Lambert P., Le Gall O., Mantin C., Pascal T., Schurdi-Levraud V. et Kervella J., 2005. Analogues of virus resistance genes map to QTLs for resistance to sharka disease in *Prunus davidiana*. *Mol. Gen. Genet.*, 272, 680-689.

Delbard G., 1993. *Les beaux fruits de France d'hier et d'aujourd'hui*. Éditions G. Delbard, Paris, 270 p.

Dirlewanger E. et Arús P., 2004. Markers in Fruit Tree Breeding : Improvement of Peach. Dans : *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, H. Lörz et G. Wenzel éd., Springer-Verlag, Berlin, 55, 279-302.

Dirlewanger E., Cosson P., Tavaud M., Aranzana M.-J., Poizat C., Zanetto A., Arús P. et Laigret F., 2002. Development of microsatellite markers in peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] and their use in genetic diversity analysis in peach and sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 105, 127-138.

Dirlewanger E., Graziano E., Joobeur T., Garriga-Calderé F., Cosson P., Howad W. et Arús P., 2004. Comparative mapping and marker assisted selection in *Rosaceae* fruit crops. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101, 9891-9896.

Dosba F. et Lespinasse Y., 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.

Foulongne M., Pascal T., Pfeiffer F. et Kervella J., 2003. QTLs for powdery mildew resistance in peach $\times$ *Prunus davidiana* crosses : consistency across generations and environments. *Mol. Breed.*, 12, 33-50.

Foulongne M., Pascal T., Arús P. et Kervella J., 2003. The potential of *Prunus davidiana* for introgression into peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] assessed by comparative mapping. *Theor. Appl. Genet.*, 107, 227-238.

Gautier M., 2001. Pêcher. Dans : *La culture fruitière*. Tome 2 : *Les productions fruitières*. Tec & Doc, Paris, 247-335.

Giauque P. et Hilaire C., 2002. *Les variétés de pêches et de nectarines*. Ctifl, Paris, 223 p.

Hilaire C. et Giauque P., 1994. « Pêche » : *les variétés et leur conduite*. Ctifl, Paris, 307 p.

Hugard J. et Saunier R., 1969. *Monographie des principales variétés de pêcher, période d'études 1950-1962*. INRA Éditions, Paris, 275 p.

Jeannequin B., Dosba F. et Amiot-Carlin M.J., coord., 2005. *Fruits et légumes : caractéristiques et principaux enjeux*. INRA Éditions, Paris, 115 p.

Joobeur T., Viruel M.-A., de Vicente M.-C., Jàuregui B., Ballester J., Dettori M.-T., Verde I., Truco M.-J., Messeguer R., Batlle I., Quarta R., Dirlewanger E. et Arús P., 1998. Construction of a saturated linkage map for *Prunus* using an almond $\times$ peach F_2 progeny. *Theor. Appl. Genet.*, 97, 1034-1041.

Layne D.R. et Bassi D. (éd.), 2006. *The Peach : botany, production and uses*. CABI Publishing, Wallingford (sous presse).

Monet R., 1977. Amélioration du pêcher par voie sexuée, exposé d'une méthode. *Ann. Amélior. Plant.*, 27 (2), 223-234.

Monet R., 1983. *Le pêcher : génétique et physiologie*. Masson Édition, Paris, 133 p.

- Monet R.**, 1992. Le pêcher. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 593-604.
- Monet R.**, 1995. *Il Miglioramento genetico del pesco*. Symposium International : Stato dell'Arte e Prospettive del Miglioramento genetico dei Fruttiferi (pesco, susino, albicocco e pero). (ERSO) Faenza, 13 octobre 1995, 13-27.
- Okie W.R.**, 1998. *Handbook of Peach and Nectarine Varieties*. Agriculture Handbook Number 714, USDA, Byron, 808 p.
- Pascal T., Pfeiffer F., Kervella J., Lacroze J.-P. et Sauge M.-H.**, 2002. Inheritance of green peach aphid resistance in the peach cultivar 'Rubira'. *Plant Breed.*, 121 (5), 459-461.
- Quilot B., Génard M., Kervella J. et Lescouret F.**, 2004. Analysis of genotypic variation in fruit flesh total sugar content via an ecophysiological model applied to peach. *Theor. Appl. Genet.*, 109 (2), 440-449.
- Quilot B., Wu B. H., Kervella J. et Lescouret F.**, 2004. QTL analysis of quality traits in an advanced backcross between *Prunus persica* cultivars and the wild relative species *P. davidiana*. *Theor. Appl. Genet.*, 109 (4), 884-897.
- Sauge M.-H., Pascal T., Lacroze J.-P., Pfeiffer F., Kervella J.**, 2004. Mapping of a genetic factor of partial resistance to *Myzus persicae* in the wild peach *Prunus davidiana*, that impedes phloem sap ingestion by the aphid. Dans : *Aphids in a new millennium*, J.-C. Simon, C.A. Dedryver, C. Rispe et M. Hullé, éd. INRA Éditions, Paris, 499-505.
- Scorza R. et Okie W. R.**, 1990. Peaches (*Prunus*). *Acta Hortic.* 290, 175-231.
- Scorza R., Mehlenbacher S. A. et Lightner G.W.**, 1985. Inbreeding and coancestry of freestone peach cultivars of the Eastern United States and implications for peach germplasm improvement. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 110 (4), 547-552.
- Scott J.W. et Weinberger J.H.**, 1944. Inheritance of pollen sterility in some peach varieties. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 9, 187-188.
- Société Nationale d'Horticulture de France**, 1903. Pêcher. Dans : *Les meilleurs fruits au début du XX^e siècle*. SNHF, Paris, 279-345.
- Vidaud J.**, 1987. *Le pêcher, références et techniques*. Éditions Ctifl, Paris, 456 p.
- Wu B., Quilot B., Kervella J., Génard M. et Shaohua L.**, 2003. Analysis of genetic variation of sugar and acid contents in peach and nectarines through the principle component analysis. *Euphytica*, 132 (3), 375-384.
- Ye X., Brown S.K., Scorza R., Cordts J. et Sandford J.C.**, 1994. Genetic transformation of peach tissues by particle bombardement. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 119 (2), 367-373.
- Zanetto A., Maggioni L., Tobutt K.R. et Dosba F.**, 2002. *Prunus* genetic resources in Europe : Achievement and perspectives of a networking activity. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 49, 331-337.

Les peupliers

Populus spp. ($2n = 2x = 38$)
(Salicacées)

Présentation du genre

Le genre *Populus* L. regroupe 29 espèces réparties en 6 sections botaniques. Les espèces *Populus nigra* L. (peuplier noir), *P. alba* L. (peuplier blanc) et *P. tremula* L. (tremble) sont les espèces autochtones en Europe. Le peuplier est souvent cité par les Grecs. Par exemple, la nymphe Leucé se serait métamorphosée en peuplier pour échapper à Hadès. Au Moyen Âge, le bois de peuplier était couramment utilisé pour la fabrication de sabots, de boucliers et de sculptures. Au XVIII^e siècle, *P. deltoides* Bartr. ex Marsh. a été introduit d'Amérique du Nord en France. Des hybrides naturels se sont produits entre *P. deltoides* et *P. nigra* et ces hybrides constituent encore actuellement la majorité des peupliers cultivés en Europe occidentale. La culture du peuplier est devenue importante en France à partir de la moitié du XVIII^e siècle. Avant 1939, une dizaine de variétés était cultivée sur environ 100 000 ha en France. En 1942, l'arrêt de l'importation de tremble de Scandinavie pour les allumettes et d'okoumé d'Afrique (*Aukoumea klaineana* Pierre) pour le contre-plaqué a relancé la culture du peuplier.

Le genre *Populus* est composé d'espèces majoritairement dioïques à pollinisation anémophile. Les graines de peuplier sont très petites et n'ont pratiquement pas de réserves. En culture, le peuplier est multiplié végétativement par boutures. Les nombreuses plantations de peuplier peuvent être à l'origine de brassage génétique avec les populations autochtones de *P. nigra*. Des études scientifiques réalisées sur les caractéristiques physiologiques de tels croisements indiquent que cette pollinisation est théoriquement possible. Cependant, suite aux travaux réalisés actuellement en France sur la diversité génétique et la conservation du *P. nigra*, il semblerait qu'un tel événement soit possible, mais rare.

La variabilité du genre *Populus* est très importante, ce qui s'explique, au moins en partie, par les nombreuses possibilités de croisements qui existent entre la trentaine d'espèces de ce genre. Les peupliers occupent une place importante dans l'hémisphère boréal, au nord du 30^e parallèle.

De nombreux pays conservent des collections de peuplier. En France, un programme national de conservation de l'espèce autochtone, *P. nigra*, est engagé depuis 1992, parrainé par le Bureau des ressources génétiques (BRG) et le ministère de l'Agriculture (DGFAR, Commission des ressources génétiques forestières).

Production et utilisation

Le produit récolté est le bois. Actuellement, les peupleraies sont établies pour 15/25 ans et couvrent 230 000 ha en France, avec une récolte annuelle de 1,5 à 2 millions de mètres cubes de bois d'œuvre. Elles permettent de produire plus de 30 % du bois de feuillus sur une surface représentant 1,4 % de la forêt française. Le peuplier est donc un arbre très productif en bois.

Le bois de peuplier peut être transformé en de nombreux produits. C'est ainsi que le déroulage permet de produire principalement du contre-plaqué et des emballages légers (cagettes). Par ailleurs, le sciage permet de fabriquer des charpentes et des palettes. Enfin, le bois de peuplier est utilisé par l'industrie pour la réalisation de pâte à papier (*cf.* encadré ci-dessous).

Lignines et pâte à papier

Les lignines sont des molécules importantes pour le règne végétal. Elles imprègnent les parois des cellules végétales conduisant à la formation de tissus érigés rigides. Elles ont aussi un rôle prédominant dans la réalisation de tissus conducteurs imperméables de la plante permettant la circulation de la sève. L'acquisition de la capacité à biosynthétiser des lignines a donc été un événement clé dans la conquête du milieu terrestre par les plantes, il y a environ 450 millions d'années.

La pâte à papier peut être produite à l'aide du procédé Kraft qui consiste en une cuisson de 2 à 5 heures, à environ 175 °C, de copeaux de bois dans une solution de soude et de sulfure de sodium. Le but de ce traitement, dont l'efficacité est mesurée par l'indice Kappa, est d'éliminer la lignine du bois, afin qu'il ne reste plus que de la cellulose qui va alors pouvoir être utilisée pour la fabrication du papier.

Histoire des variétés cultivées en France

Fin XVIII^e siècle, '**Carolin**', exemple de variété de l'espèce *P. deltoides*, introduite des États-Unis au XVIII^e siècle. Cette variété mâle donnait un bois estimé pour le déroulage et le sciage. Elle ne pouvait être cultivée que dans le midi et le sud-ouest de la France.

1895, '**Robusta**', exemple de variété de peuplier hybride spontané eurasien (*Populus euramericana* Guinier), sélectionnée en France, qui a occupé des surfaces importantes de plantation jusqu'en 1959. Ainsi, en 1950, cette variété représentait 65 % de la production française. Elle se distingue par un port de l'arbre idéal pour la plantation d'alignement, une grande résistance au chancre bactérien et une densité de bois remarquable. Malgré toutes ces qualités, cette

variété n'est presque plus cultivée car elle est entièrement dépassée du fait de sa faible productivité.

1929, '**I-214**', variété clonale femelle hybride d'Italie, issue du croisement *P. deltoides* × *P. nigra* se caractérisant par une résistance à la tavelure, une bonne productivité et une qualité de bois satisfaisante pour le déroulage en vue de la fabrication de contre-plaqué. Cette variété a été créée à la suite d'une épidémie de tavelure en Italie. Elle n'a été inscrite en France qu'en 1958. Elle a alors supplanté la variété 'Robusta'. La difficulté de conduite d'une peupleraie de cette variété et surtout sa grande sensibilité à *Marssonina brunnea*, champignon attaquant les feuilles, sont deux éléments qui peuvent limiter son usage. Cette variété reste encore très populaire en France.

1952, '**Dorskamp**', variété hybride mâle des Pays-Bas, issue du croisement *P. deltoides* × *P. nigra* se caractérisant par une résistance à *Marssonina brunnea*. Cette maladie n'existait pas spontanément en Europe. Elle est probablement venue d'Amérique du Nord avec des boutures. Cette variété a été créée pour endiguer une épidémie qui a touché toute l'Europe. Sa facilité de conduite de culture due à une bonne dominance apicale, sa faible exigence envers la qualité du sol et l'alimentation en eau (cette variété peut être plantée en zones hors vallées) et enfin la bonne qualité de son bois pour le déroulage et la fabrication de contre-plaqué ont assuré le succès de cette variété. Cette variété a été inscrite au catalogue officiel français en 1974.

1968, '**Luisa Avanzo**', variété hybride italienne, issue du croisement *P. deltoides* × *P. nigra* se caractérisant par une résistance à *Marssonina brunnea*. Cette variété a, elle aussi, été créée dans le but de faire barrage à l'épidémie. Elle n'est arrivée en France qu'en 1987. Cette variété n'est plus utilisée car elle s'est avérée très sensible à la rouille foliaire due à *Melampsora larici-populina* et non adaptée aux fluctuations des nappes phréatiques des peupleraies de vallée.

1974, '**Beaupré**', variété hybride belge, issue du croisement *P. deltoides* × *P. trichocarpa* Torr. & Gray ex Hook. se caractérisant par une résistance complète à la rouille foliaire et au chancre bactérien. Elle a, de plus, une grande plasticité, une bonne vigueur et une bonne qualité de bois qui lui assurèrent un grand succès. La profession parla même du « Beaupré sans souci ». Cette variété est arrivée en France en 1982. La résistance à la rouille a été, depuis, contournée et cette variété est actuellement abandonnée, sachant que des traitements phytosanitaires coûteux sont obligatoires pour sauvegarder les plantations existantes.

Années 1980, '**Koster**', variété hybride des Pays-Bas, issue du croisement *P. deltoides* × *P. nigra*, se caractérisant par une résistance partielle à la rouille. En France, cette variété n'a commencé à être cultivée qu'en 1999.

1992, '**Rajane**' (INRA, France), variété issue de l'hybridation entre *P. tremula* et *P. alba*. Cette variété se distingue par la possibilité d'exploiter les sols hydromorphes (c'est-à-dire gorgés d'eau en hiver et très secs en été).

Remarque. La populiculture est une culture intensive d'arbres : cette culture monoclonale et la diminution du nombre de variétés utilisées, conduisent à une réduction très forte et alarmante de la base génétique cultivée.

Regard sur 50 ans de sélection

Plus de 90 % des variétés cultivées en France sont le fruit des recherches menées dans d'autres pays européens (Italie, Belgique, Pays-Bas,...). La sélection s'est surtout attachée à améliorer le rendement et la qualité du bois, mais aussi à produire des variétés pouvant résister aux différents agents pathogènes.

Les variétés actuellement cultivées sont pratiquement toutes issues de croisements interspécifiques.

Caractères importants améliorés

Rendement. Des gains remarquables en croissance ont été réalisés grâce à la sélection d'hybrides interspécifiques.

Qualité du bois. La forme de l'arbre et la qualité du bois ont, elles aussi, été beaucoup améliorées (couleur, rectitude du fût).

Résistances aux maladies. L'amélioration du peuplier s'illustre par une lutte incessante contre les bio-agresseurs (*cf.* encadré ci-dessous).

Lutte génétique contre les bio-agresseurs

Épidémie de tavelure (due au champignon *Venturia populina*). En 1915, une épidémie de tavelure a fortement attaqué les peupleraies italiennes. La sélection italienne a permis l'obtention, en 1929, d'une variété résistante à cette maladie : 'I-214'.

Épidémie due à *Marssonina brunnea*. Ce champignon, qui attaque le feuillage, a été introduit d'Amérique du Nord en Italie en 1963, puis dans toute l'Europe où il causa des dégâts importants. Là encore, les travaux de sélection italiens et néerlandais, ont permis de présenter respectivement les variétés 'Luisa Avanzo' et 'Dorskamp', résistantes à *Marssonina brunnea*.

Épidémies de rouille foliaire (*Melampsora larici-populina*). Une des premières variétés affectées par ce champignon a été une ancienne variété très cultivée, 'Robusta'. Il a fallu attendre les années 1970 pour qu'apparaissent les premières variétés ('Beaupré', 'Unal',...) cumulant une bonne tolérance à *Marssonina brunnea* et une résistance complète à la rouille foliaire. En 1982, une nouvelle race de rouille est apparue. Elle s'est avérée capable de contourner la résistance de certaines variétés telles qu' 'Unal'. En 1994, la variété 'Beaupré' a subi les attaques graves d'une nouvelle race de rouille (E4). Ces attaques ont surpris les populteurs et un grand nombre de peupleraies n'a pu être sauvé que par l'usage de traitements chimiques.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI à l'étranger 'Donetskii Zolotoi' est une variété russe de l'espèce <i>P. trichocarpa</i>, obtenue par mutagenèse aux rayons γ en 1977. Il n'est pas certain que cette variété soit effectivement cultivée. ESSAIS à l'étranger L'induction de variations somaclonales <i>in vitro</i> est une méthode qui a été utilisée pour créer de la variabilité, notamment dans l'architecture de la plante. La mutagenèse n'a pas beaucoup d'intérêt pour l'amélioration du peuplier du fait de la grande diversité existante dans les populations sauvages naturelles et au sein des hybrides interspécifiques.
Croisements interspécifiques	OUI 95 % des variétés de peuplier sont des hybrides interspécifiques. Les deux types principaux sont des : – hybrides euraméricains : <i>P. deltoides</i> $\times$ <i>P. nigra</i> ; – hybrides interaméricains : <i>P. deltoides</i> $\times$ <i>P. trichocarpa</i>. Dans la plupart des croisements interspécifiques, le recours à la culture d'embryons <i>in vitro</i> permet d'améliorer le taux d'obtention des hybrides.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1987 grâce à l'utilisation d'<i>Agrobacterium tumefaciens</i>. Essais au champ et commercialisation. Les États-Unis, la Chine et la France réalisent des essais au champ de peuplier transgénique. Par contre, aucune variété transgénique n'est jusqu'à présent commercialisée. Exemples d'essais menés aux États-Unis : – peupliers résistants aux insectes grâce à l'introduction de gènes d'une bactérie entomopathogène (<i>Bacillus thuringiensis</i>) codant des endotoxines ; – peupliers résistants au glyphosate (herbicide). Un meilleur contrôle des mauvaises herbes permet de faciliter la conduite et d'augmenter la productivité de la peupleraie ; – peupliers stériles. Du fait de la capacité des peupliers cultivés à polliniser les espèces sauvages, il semble incontournable de doter les variétés transgéniques d'un système de stérilité intégrant des caractères tels que la résistance aux herbicides et aux insectes, afin d'empêcher la dissémination des transgènes. La culture de variétés de peuplier mâle et femelle stérile permettrait de limiter les problèmes d'allergie liés au pollen et de pollution génétique des espèces sauvages au voisinage des peupleraies. Enfin, une part non négligeable de l'énergie et des métabolites produits par la plante étant destinée à la production de pollen (dans le cas d'une plante mâle) ou de « coton » <i>suite...</i>

... suite

(dans le cas d'une plante femelle), il est probable qu'une plante stérile, en relocalisant cette énergie et les métabolites à d'autres tâches, serait plus productive.

Exemple d'essai mené en France :

– **Qualité du bois.** Une plante transgénique exprimant un gène antisens de la cinnamylalcool déshydrogénase (CAD), une enzyme clé dans la voie de biosynthèse de la lignine, a la caractéristique intéressante d'avoir une lignine plus facilement extractible par le procédé Kraft pour la réalisation de papier tout en conservant une croissance normale.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplification végétative	OUI Les peupliers se multiplient très facilement par drageons et boutures.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	Les espèces du genre <i>Populus</i> étant dioïques (sauf une, <i>P. lasiocarpa</i> Oliv.), une plante femelle est donc naturellement mâle stérile.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires ont déjà été utilisés pour identifier les clones et contrôler le matériel de propagation. Des travaux sont en cours pour rechercher des marqueurs de résistance aux maladies afin de réaliser une sélection assistée par marqueurs. Par exemple, des marqueurs moléculaires de gènes de résistance à différentes races de <i>Melampsora larici-populina</i> et du gène <i>Mmd1</i> de résistance à <i>Melampsora medusae</i> sont identifiés depuis 1996. Le développement des marqueurs moléculaires et celui de la génomique sont facilités par la taille relativement petite du génome du peuplier. La séquence de l'ensemble du génome du peuplier a été rendue publique en 2004.
MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection récurrente intra- et interspécifique.
Types variétaux	Variété clonale. Plus de 95 % des peupliers utilisés en populiculture appartiennent à des variétés clonales issues de croisements interspécifiques.

Perspectives d'amélioration

En matière d'amélioration génétique, le principal objectif du Groupement d'intérêt scientifique génétique, Amélioration et Protection du peuplier (GIS Peuplier, regroupant l'AFOCEL, le CEMAGREF et l'INRA) est de proposer à la populiculture du matériel végétal performant, adapté aux principales conditions stationnelles et offrant une tolérance suffisante et stable envers les principales adversités et, en particulier, les maladies les plus dommageables.

Le programme national de création variétale repose sur la valorisation de la variabilité génétique rassemblée au sein de 3 populations de base représentant respectivement des trois espèces *Populus nigra*, *P. deltoides* et *P. trichocarpa*. Une veille sanitaire et scientifique est incluse dans cette stratégie de manière à prendre en compte rapidement toute nouvelle adversité ou toute percée technologique (étude du génome, par exemple) permettant de réduire les délais de sélection ou de mieux répondre aux objectifs.

Les pays les plus actifs en matière d'amélioration restent l'Europe (Belgique, France et Italie), le Canada, les États-Unis, le Chili et la Chine.

Choisi en raison de son génome relativement compact, le peuplier est devenu depuis les années 1980, l'espèce modèle des arbres forestiers en ce qui concerne l'application des biotechnologies. Cet effort a abouti en 2004 à l'obtention de la séquence complète de son génome (40 000 gènes).

Caractères à améliorer

Résistances aux maladies. Actuellement, les traitements chimiques sont utilisés pour sauver des peupleraies attaquées par de nouvelles races de rouille (*Melampsora larici-populina* E4). Aucun hybride *P. trichocarpa* × *P. deltoides* ne possède, jusqu'à présent, une telle résistance et les essais de plantations multi-clonales, qui ont été réalisés avec l'objectif de réduire la pression de la rouille, n'ont pas été concluants. Actuellement, la recherche d'une résistance durable vis-à-vis de la rouille (*Melampsora* spp.) reste donc l'objectif prioritaire.

Fabrication de la pâte à papier de manière non polluante. Le procédé Kraft est certainement la plus grande source de pollution du sol et de l'air de l'industrie du bois. La transgénèse offre des perspectives, car elle permet de modifier les voies de biosynthèse de la lignine.

Techniques à développer

Le récent décryptage de son génome va permettre d'accélérer les programmes de recherche de cette espèce et d'autres espèces forestières.

Le développement des marqueurs moléculaires devrait être d'un grand secours dans la réalisation de variétés possédant des résistances durables aux maladies.

De nombreuses combinaisons d'espèces restent à essayer en croisements interspécifiques (de première génération) mais également par l'utilisation de rétro-croisements.

La transgénèse est un outil utilisé depuis longtemps sur cette espèce. L'application de la transgénèse à la production de variétés commerciales n'est pas envisagée, jusqu'à présent.

Inscription et protection des variétés en France

1942, création de la Commission nationale du peuplier (CNP). Cette commission est dirigée par la Direction de l'espace rural et de la forêt (DERF) dépendant du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

1947, création, sous l'égide de la FAO et à l'initiative de la France, de la Commission internationale du peuplier.

1982, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de matériels de base de peuplier destinés à la production des matériels forestiers de reproduction contrôlée.

2001, création du Groupement d'intérêt scientifique génétique, amélioration et protection du peuplier (GIS Peuplier, regroupant l'AFOCEL, le CEMAGREF et l'INRA).

2003, arrêté ministériel relatif au règlement technique d'admission des clones de peuplier destinés à la production, par voie végétative, de matériels forestiers de reproduction en catégorie testée.

2004, suppression de la CNP (arrêté du 6 janvier 2005).

Toute variété inscrite (protégée ou non) dans un des 25 pays de l'Union européenne peut être commercialisée en France. Au 01/03/2002, 145 variétés monoclonales étaient dans ce cas (liste 1). Toutes ces variétés ne sont pas adaptées aux conditions pédoclimatiques et sanitaires françaises. C'est pour cela que l'INRA, l'AFOCEL, le CEMAGREF et l'Institut pour le développement forestier (IDF) ont présélectionné 44 variétés, actuellement jugées intéressantes pour la populiculture française (liste 2).

Mais, il existe une autre étape à franchir pour qu'une nouvelle variété puisse connaître un succès commercial. Le CEMAGREF et l'AFOCEL et, depuis 2001, le GIS Peuplier testent ces variétés et soumettent leurs conclusions, avec celles de l'IDF, aux services du ministère en charge de la Forêt. Puis, ceux-ci définissent, par circulaire, une liste régionalisée de variétés de peuplier éligibles aux aides de l'État lors de nouvelles plantations. Pratiquement, une variété non subventionnée n'est pas plantée. Ainsi, en 2004, 17 variétés étaient sur cette liste (liste 3). Cette troisième liste évolue en fonction des informations disponibles sur les variétés commercialisables.

Pour en savoir plus

Site internet de *The International Poplar Consortium* (consortium international qui a rendu publique la séquence du génome du peuplier en 2004) : www.ornl.gov/sci/ipgc

Dowkiw A., Husson C., Frey P., Pinon J. et Bastien C., 2003. Partial resistance to *Melampsora larici-populina* leaf rust in hybrid poplars : genetic variability in inoculated excised leaf disk bioassay and relationship with complete resistance. *Phytopathology*, 93, 421-427.

Gallardo F., Fu J., Canton F.R., Garcia-Gutierrez A., Canovas F.M. et Kirby E.G., 1999. Expression of a conifer glutamine synthetase gene in transgenic poplar. *Planta*, 210 (1), 19-26.

- Imbert E. et Lefèvre F.**, 2003. Dispersal and gene flow of *Populus nigra* (Salicaceae) along a dynamic river system. *J. Ecol.*, 91, 447-456.
- Lapierre C., Pollet B., Petit-Conil M., Toval G., Romero J., Pilate G., Leplé J.-C., Borjeau W., Ferret V., de Nadai V. et Jouanin L.**, 1999. Structural alterations of lignins in transgenic poplars with depressed cinnamyl alcohol dehydrogenase or caffeic acid *O*-methyltransferase activity have opposite impact on the efficiency of industrial Kraft pulping. *Plant Physiol.*, 119, 153-163.
- Liang H., Catranis C.M., Maynard C.A. et Powell W.A.**, 2002. Enhanced resistance to the poplar fungal pathogen, *Septoria musiva*, in hybrid poplar clones transformed with genes encoding antimicrobial peptides. *Biotechnol. Lett.*, 24 (5), 383-389.
- Marron N., Delay D., Petit J.-M., Dreyer E., G. Kalhem, Delmotte F.-M. et Brignolas F.**, 2002. Physiological traits of two *Populus* $\times$ *euramericana* clones, 'Luisa-Avanzo' and 'Dorskamp', during a water-stress and re-watering cycle. *Tree Physiol.*, 22, 849-858.
- Miot S., Frey P. et Pinon J.**, 1999. Varietal mixture of poplar clones : Effects on infection by *Melampsora larici-populina* and on plant growth. *Eur. J. For. Pathol.*, 29, 411-423.
- Pinon J., Frey P. et Villar M.**, 2001. La populiculture à la recherche de la résistance durable aux maladies. *Forêt Privée*, 258, 25-32.
- Pilate G., Guiney E., Holt K., Petit-Conil M., Lapierre C., Leplé J.-C., Pollet B., Mila I., Webster E.A., Marstorp H.G., Hopkins D.W., Jouanin L., Boerjan W., Schuch W., Cornu D. et Halpin C.**, 2002. Field and pulping performances of transgenic trees with altered lignification. *Nat. Biotechnol.*, 20, 607-612.
- Stettler R.F., Bradshaw H.D. Jr, Heilman P.E. et Hinckley T.M., ed.**, 1996. *Biology of Populus and its implication for management and conservation*. NRC Research Press, Ottawa, 539 p.
- Strauss S.H., Difazio S.P. et Meilan R.**, 2001. Genetically modified poplars in context. *For. Chron.*, 77 (2), 271-279.
- Teissier du Cros E. et Bastien C.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres forestiers. *Sél. Fr.*, 53, 103-113.
- Villar M., Lefèvre F., Leple J.C., Pichot C. et Teissier du Cros E.**, 1992. Les peupliers. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 673-683.
- Villar M., Lefèvre F., Augustin S., Bonduelle P., Delplanque A., Duval H., Faivre-Rampant P., Goué M.C., Legionnet A., Ménard M., Nesme X., Pilate G., Pinon J., Valadon A. et Teissier du Cros E.**, 1995. Perspectives d'amélioration génétique des peupliers en France. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 81, 137-152.
- Wu R.L.**, 1998. Genetic mapping of QTLs affecting tree growth and architecture in *Populus* : implication for ideotype breeding. *Theor. Appl. Genet.*, 96 (3/4), 447-457.
- Wullschlegel S.D., Jansson S. et Taylor G.**, 2002. Genomics and Forest Biology : *Populus* emerges as the perennial favorite. *Plant Cell*, 74, 2651-2655.
- Zhang J., Steenackers M., Storme V., Neyrinck S., van Montagu M., Gerats T. et Boerjan W.**, 2001. Fine mapping and identification of nucleotide binding site / leucine-rich repeat sequences at the MER locus in *Populus deltoides* 'S9-2'. *Phytopathology*, 91 (11), 1069-1073.

Le piment commun

Capsicum annuum L. ($2n = 2x = 24$)
(Solanacées)

Présentation de l'espèce

Le piment commun, *Capsicum annuum* L., fait partie d'un ensemble de 25 espèces dont 5 ont été domestiquées, propagées et diversifiées par des peuples amérindiens. Le piment est originaire d'Amérique centrale. Il était déjà utilisé au Mexique 7 000 à 5 000 ans av. J.-C. Il a été introduit en Europe occidentale au XV^e siècle par Christophe Colomb, dès son premier voyage en 1493, et en Afrique et Asie à la faveur des voyageurs vers les comptoirs portugais et espagnols. Sa diffusion a aussi été assurée par les missionnaires franciscains et jésuites. Le Bassin méditerranéen et l'Asie du Sud-Est ont constitué des centres secondaires de diversification. En Europe de l'Ouest, sa culture s'est répandue d'abord dans la péninsule ibérique. Ce nouveau produit fut rapidement adopté en tant qu'épice appréciée par les marins notamment, en raison de ses propriétés antiscorbutiques (*cf.* encadré p. 544).

Il est largement cultivé depuis le XVIII^e siècle. En France, toutefois, il n'a pas connu un grand essor à l'exception du Midi où se sont développées des variétés locales originales. Ce n'est que depuis les années 1970 que sa culture connaît un développement pour tenter de réduire les importations devenues massives, en raison de l'intérêt nouveau porté à ce légume.

Le piment est une espèce annuelle, autogame préférentielle et multipliée par semences. Elle peut être pérenne dans son centre d'origine et ses zones de diversification. En France, il n'y a pas d'espèce sauvage avec laquelle le piment soit susceptible de se croiser.

La FAO a recensé environ 100 pays répartis sur tous les continents ayant une production de piment. Cette grande dispersion laisse supposer que cette espèce dispose d'une grande variabilité morphologique (forme et couleur du fruit) et physiologique.

Piment et vitamine C

Le piment est, après le persil (*Petroselinum crispum* (Mill.) Nyman ex A.W. Hill), le légume qui contient le plus de vitamine C (150 à 300 mg pour 100 g de poids frais). En 1928, Albert Szent-Györgyi, biochimiste nord-américain d'origine hongroise réussit à extraire 500 g de vitamine C à partir de 2 tonnes de piment. Ce chercheur isole, cristallise pour la première fois la vitamine C et la nomme acide ascorbique. Ces travaux lui ont valu le prix Nobel de chimie en 1937.

La variabilité du piment est conservée au sein de plusieurs collections dans le monde. Le *Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Enseñanza* (CATIE) à Turrialba au Costa Rica et l'AVRDC à Taiwan entretiennent des banques internationales de gènes. De nombreux centres nationaux de recherche (USDA, INRA, VIR,...) et plusieurs entreprises privées entretiennent des collections de variétés et populations collectées dans le monde entier et échangent informations et matériel végétal.

L'INRA et des établissements privés ont recensé et étudié les populations du Bassin méditerranéen dans les années 1960. Il existe une collection INRA d'environ 1 500 génotypes qui contribue à la collection nationale du réseau « Solanacées à graines ». Cette dernière collection créée en 1998 par l'INRA, le GEVES et les obtenteurs privés sur appel d'offre du BRG, contient, à ce jour, seulement 1/10^e du matériel entretenu par l'INRA. Localisée à l'Unité GEVES de Cavaillon (Vaucluse) et maintenue par ses partenaires, elle s'accroît chaque année. L'évaluation de ces ressources génétiques est en cours.

Production et utilisation

Le produit récolté est un fruit charnu, une baie creuse désignée sous le nom de :
 – « piment », lorsque le fruit est petit, le plus souvent pointu et que sa saveur est plus ou moins brûlante ;
 – « poivron », lorsque le fruit est gros, quelle que soit sa forme et que sa saveur est douce.

La plante est toujours désignée sous le nom vernaculaire « piment », quel que soit le fruit produit. Ce dernier est récolté mûr (rouge, orange ou jaune) ou non (vert, ivoire ou violet) et consommé cru ou cuit, comme légume, condiment ou épice : on distingue ainsi le piment légume du piment épice. Le premier est une plante maraîchère donnant des fruits consommés tels que ou après une préparation culinaire (qu'il s'agisse de poivron ou de piment fort) tandis que le second est cultivé de façon industrielle et est destiné à la production de poudre.

La production mondiale de piment légume en 2004 était de 24 millions de tonnes (de fruit frais), dont environ la moitié était produite en Chine (12 millions de tonnes). Le Mexique (1,85 million de tonnes), la Turquie (1,79 million de tonnes), l'Espagne (1 million de tonnes), les États-Unis (0,98 million de tonnes) et le Nigeria (0,72 million de tonnes) sont aussi des

producteurs importants. La production française de piment légume est de 28 000 tonnes alors que les importations sont massives et en augmentation constante en provenance d'Italie et d'Espagne (données FAO, 2004).

Une petite partie de la production est utilisée pour la conserverie et pour la fabrication de concentrés. Il peut être séché entier ou réduit en poudre. De la poudre séchée sont aussi extraites la capsanthine et la capsorubine (oléorésines), principaux colorants naturels rouges utilisés en industrie agro-alimentaire.

Le piment a de nombreux usages diététiques et pharmaceutiques, notamment. Le piment stimule l'appétit et la digestion. Il est favorable à la circulation sanguine. Il contient de la capsaïcine, phénolamide accompagnée de dérivés hydroxylés dont les effets peuvent être désirables ou non, selon les cas.

Il existe de nombreux types à l'intérieur de l'espèce, principalement définis par les caractères du fruit (en particulier la forme géométrique de sa section longitudinale : triangle ou corne, carré, rectangle,...) ou de la plante adaptée au type de culture (maraîchère ou industrielle).

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

‘Carré doux d'Amérique’ ou **‘Gros carré doux’**, variété population très courante dans les cultures commerciales du Midi dans les années 1960, dont le fruit est gros, anguleux et presque carré et de saveur douce.

‘Doux long des Landes’, variété dont le fruit est doux, triangulaire, très étroit, allongé et vendu à la douzaine lorsqu'il est encore vert. C'est à partir de cette variété locale que l'INRA d'Avignon (Vaucluse) a obtenu, dans les années 1970, une série de plantes trisomiques, matériel utilisé pour la localisation des gènes. Un type donnant un fruit plus long, inscrit en 1999 sous la dénomination variétale **‘Doux très long des Landes’**, est encore cultivé dans le Sud-Ouest.

‘Piment d'Espelette’, variété population du Pays basque dont le fruit triangulaire est séché au soleil et réduit en poudre. Cette poudre sert à parfumer et colorer des spécialités charcutières. Une lignée de cette population a été inscrite en 1999 au catalogue français sous la dénomination variétale **‘Gorria’**.

‘Petit Marseillais’, variété très précoce donnant un petit poivron rectangulaire à chair fine et de couleur orangée qui est consommé vert en saison.

‘Antibois’, variété dont le fruit de forme subsphérique, possède un parfum particulier, à chair épaisse et ferme pour une utilisation en conserve.

‘Lagnes’, variété population du Vaucluse, dont le fruit est rectangulaire et de calibre important. Cette population est à l'origine de nombreuses lignées parentales de variétés hybrides F₁ très cultivées.

‘Poivre rouge de Bresse’, variété à petit fruit brûlant rectangulaire. Elle est probablement cultivée de très longue date dans la vallée de la Saône, puisqu'on

dit qu'elle était cultivée pour la garnison espagnole de Franche-Comté avant que cette province ne soit conquise par Louis XIV.

Variétés récentes

1953, **'Yolo Wonder'** (université de Davis, Californie, États-Unis), variété lignée sélectionnée aux États-Unis, résistante au virus de la mosaïque du tabac (TMV), dont le fruit, un poivron, est de forme régulière et de type carré américain. Cette lignée est à l'origine de plusieurs lignées parentales de variétés hybrides F₁.

1973, **'Lamuyo'** (INRA, France), première variété hybride F₁. Son fruit est de type rectangulaire méditerranéen. Cette variété très rustique a connu un grand succès : elle a longtemps dominé le marché dans les zones de culture de plein champ précoce en France, en Espagne et en Italie. Un des parents de cette variété est issu de la population 'Lagnes', l'autre est issu de 'Yolo Wonder'.

1973, **'Gédéon'** (Les Graines Caillard, France), variété hybride F₁ tolérante au froid, donnant de gros fruits (des poivrons) uniformes rectangulaires.

1980, **'Sonar'** (Clause, France), variété hybride F₁ de type 'Lamuyo', très cultivée en France et en Espagne dans les années 1980 pour son rendement en culture de printemps et d'été.

1986, **'Vidi'** (Institut de Recherche Vilmorin, France), variété hybride F₁, à forte productivité et donnant un fruit de gros calibre, destinée au marché méditerranéen.

1980-1990, **'Novi'** et **'Arianne'** (De Ruiter, Pays-Bas) variétés hybrides F₁ adaptées à la culture sous serre et hors sol. Le fruit est de type carré hollandais. 'Novi' est la première variété hybride résistante aux souches évoluées (virulentes) de TMV présentes en serre.

1991, **'Osir'** (INRA / Clause SA, France), variété hybride F₁ à gros fruit (poivron) rectangulaire. Elle possède des résistances polygéniques au virus de la mosaïque du concombre et au *Phytophthora capsici*. Un des deux parents de cette variété hybride provient d'haplodiploïdisation.

1996, **'Atlas'** (Clause Semences / INRA, France), première variété hybride F₁ française possédant un type de gros fruit (poivron) et les résistances nécessaires à un développement commercial sur le marché nord-américain.

1999, **'Gorria'**, variété du Domaine public, seule autorisée dans le cadre de l'AOC « Piment d'Espelette ».

2001, **'Runner'** (Seminis, Italie-USA), variété hybride F₁ à fruit rectangulaire, résistant au virus de la maladie bronzée de la tomate (TSWV).

2003, **'Alby'** (INRA et Clause Tézier, France) variété hybride F₁ ayant un fruit de très gros calibre. Elle associe des résistances polygéniques (virus de la mosaïque du concombre et *Phytophthora capsici*) et monogéniques (virus de la mosaïque du tabac et toutes les souches de virus Y de la pomme de terre, les

gènes de résistance procurant la résistance à une ou plusieurs souches selon leur niveau de virulence) à des caractères d'adaptation à la culture en contre-saison en zone méditerranéenne (bonne nouaison et caractère remontant).

Remarque. Depuis 1975, la majorité des variétés de piment à gros fruit (poivron) sont sélectionnées pour les marchés italien et espagnol, d'Afrique du Nord et à présent la Turquie. Clause Tézier, Vilmorin, Syngenta, Seminis, De Ruiter, Enza Zaden, Rijk Zwaan sont les leaders de ces marchés. Des établissements de sélection israéliens – Hazera, Zeraïm – et italien – Esasem – progressent aussi sur ces marchés. L'abandon des variétés locales en zone méditerranéenne constitue une perte de la diversité génétique. Par contre, la sélection a conduit à brasser des génotypes d'origines très diverses (inter- et intraspécifiques) et à construire de nouveaux génotypes, ce qui constitue un gain de diversité.

Regard sur 50 ans de sélection

Jusque dans les années 1960, les variétés cultivées en Europe étaient traditionnellement des populations locales ou des lignées issues d'une sélection massale effectuée par les agriculteurs eux-mêmes. En France, la culture du piment était surtout limitée aux régions méridionales (Sud-Ouest et Sud-Est). Les programmes d'amélioration ont essentiellement concerné les cultures standardisées à grande échelle ; ils ont conduit, au début des années 1970, à la diffusion de variétés hybrides F_1 à gros fruit carré ou rectangulaire, adaptées à la culture sous abri et résistantes au virus de la mosaïque du tabac.

La lutte contre les maladies et ravageurs étant un objectif majeur de sélection, le piment est devenu une espèce modèle pour la stratégie de cumul des résistances et pour l'utilisation de l'haploïdie pour l'analyse de ces résistances. Le transfert de ces caractères de résistance liés à plusieurs gènes dans les différents types variétaux, représente une difficulté importante. La création variétale est très active en France pour les variétés hybrides à gros fruit pour la serre et le plein champ à destination du Bassin méditerranéen (80 à 90 % de la production française de semences est exportée vers les pays de cette zone). Les semences issues de sélection française couvrent 20 % du marché mondial, pour un total de 50 millions d'euros.

Les principaux acteurs de la sélection dans le monde sont, soit des sociétés internationales possédant des filiales sur plusieurs continents (Limagrain, Syngenta, Seminis, Rijk Zwaan), soit des petites et moyennes entreprises (Graines Gautier, De Ruiter, Enza Zaden) et quelques sociétés sud-coréennes ou taiwanaises. Le marché des semences a d'abord été fortement segmenté par zone géographique avec une dominance des sélections néerlandaises en Europe du Nord, françaises en zone méditerranéenne, des États-Unis en Amérique du Nord et en Amérique du Sud, et sud-coréennes en Asie. Les pays de l'Est, particulièrement la Hongrie et la Bulgarie, sélectionnent pour leur marché des variétés hybrides F_1 à fruit

triangulaire jaune verdâtre, issues de leurs populations locales. Actuellement, le marché est internationalisé, chaque société tentant de pénétrer les différents marchés, à la fois en commercialisant sa « variété phare » dont la production est tournée vers l'exportation (par exemple, plusieurs variétés néerlandaises ont pénétré les marchés méditerranéens d'Europe de l'Est et asiatiques, pour l'exportation) et en développant des variétés adaptées aux marchés locaux (par exemple, variétés à fruit triangulaire et brûlant pour le marché du Moyen-Orient et celui d'Asie). En parallèle aux variétés hybrides F_1 de haute valeur commerciale développées par les états industrialisés, des populations consanguines plus ou moins homogènes sont commercialisées localement dans des pays en voie de développement (Asie du Sud-Est, Inde, Afrique du Nord et Afrique subsaharienne). Ce marché, plus difficile à évaluer quantitativement, reste très important au vu des surfaces cultivées dans ces pays.

Caractères importants améliorés

Résistances aux bio-agresseurs. Des résistances à plusieurs bio-agresseurs très limitants ont été acquises.

Virus de la mosaïque du tabac (Tobacco mosaic virus, TMV). La résistance par hypersensibilité est contrôlée par une série allélique. Quatre allèles issus de quatre espèces de *Capsicum* L. sont exploités couramment pour contrôler les différents pathotypes du virus, en particulier l'allèle L^3 venant de *C. chinense* Jacq. donne la résistance aux souches 1 et 2 et l'allèle L^4 venant de *C. chacoense* Hunziker donne la résistance aux souches 1, 2 et 3. Ces souches évoluées de virus, qui sont vraiment une autre forme de TMV, sont appelées virus de la mosaïque du piment (*Pepper mild mottle virus*, PMMV). Ces résistances sont fréquemment présentes dans les variétés européennes.

Virus de la mosaïque du concombre (Cucumber mosaic virus, CMV). Ce virus est un des fléaux majeurs de la culture du piment en climat tempéré ainsi que sur le continent asiatique. Il a connu depuis 1985 une extension avec l'apparition de souches plus agressives et plus virulentes. La stratégie originale, préconisée par l'INRA, de construction progressive par cumul de résistances polygéniques, a été mise en œuvre avec succès vis-à-vis de cet agent pathogène. Par apports successifs de résistances partielles d'origines diverses, les résistances à différentes étapes du cycle du virus et du développement de l'épidémie, sont associées dans un même génotype, ce qui permet de protéger la plante dès la pépinière. Seules quelques variétés hybrides F_1 européennes (coobtention INRA / Clause) ont intégré ces résistances cumulées qui sont des innovations.

Virus de la maladie bronzée de la tomate (Tomato spotted wilt virus, TSWV). La maladie bronzée de la tomate, classée maladie de quarantaine, causée par un virus particulièrement polyphage (nombreuses espèces ornementales, Solanacées, laitue *Lactuca sativa* L., chicorée *Cichorium intybus* L.,...) rend la production impropre à la commercialisation (fruit décoloré et tacheté). Son éradication par

suppression des plantes contaminées est efficace, mais peu pratiquée. L'introduction, par hybridation interspécifique d'un gène dont un allèle provient de *C. chinense*, a permis de diffuser récemment des variétés résistantes qui connaissent un certain développement.

Potyvirus. Plusieurs potyvirus, provoquant des mosaïques foliaires ou des marbrures sur le fruit, affectent le piment de façon évolutive, en particulier le virus Y de la pomme de terre (*Potato virus Y*, PVY). Une stratégie de type cumul de gènes de résistance par hypersensibilité combinée à d'autres formes telles que des résistances récessives ou une résistance partielle, permet de les associer efficacement et d'élargir le spectre d'action des gènes grâce à leur complémentarité. De nombreuses variétés ont intégré la résistance au PVY. Cette stratégie a également été appliquée vis-à-vis des virus de la marbrure des nervures du piment (*Pepper veinal mottle virus*, PVMV et *Chilli veinal mottle virus*, ChiVMV), deux autres potyvirus présents sur les continents africain et asiatique.

Champignons du sol. La pourriture du collet provoquée par *Phytophthora capsici*, qui sévit particulièrement dans les zones irriguées par gravité, et la verticilliose, maladie vasculaire provoquée par *Verticillium dahliae*, sont deux maladies importantes causées par des champignons telluriques. Seules des résistances partielles ont été trouvées dans la variabilité naturelle de *C. annuum* pour le premier et de moindres sensibilités seulement pour le second. Des variétés d'origines très diverses ont été intercroisées et après deux cycles de sélection récurrente, des lignées transgressives (c'est-à-dire dont la résistance est supérieure à celles des parents) ont été obtenues, montrant un niveau de résistance remarquable. Un programme de sélection assistée par marqueurs a ensuite été appliqué pour introduire des qualités agronomiques dans la population sans risquer de perdre les gènes de résistance. Des variétés partiellement résistantes au *Phytophthora capsici* ont été sélectionnées depuis 1978. Les nouvelles connaissances et outils devraient permettre d'augmenter le niveau de résistance et de qualité des variétés.

Nématodes. Le piment est sensible aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.). Les dégâts croissants observés en zone méditerranéenne, surtout sous abri, et l'interdiction d'utiliser le bromure de méthyle dans les états de l'Union européenne, motivent la sélection de porte-greffe. Sur les 4 gènes de résistance connus, 2 ont un spectre large et permettent chacun de donner la résistance à toutes les souches (*Me1* et *Me3*). Ils sont utilisés en sélection. Actuellement, il n'y a pas de variété commerciale résistante. Le gène *Me1* est en cours d'introduction par les sélectionneurs privés.

Régularité de production. La régularité de production et de qualité sur une période de culture et de récolte allongée (6 mois en plein champ et 12 mois en serre) permet de doubler, voire tripler, le rendement commercial. Cette régularité a été apportée par la maîtrise des techniques culturales et la sélection de variétés adaptées qui permettent d'assurer et de maintenir un équilibre entre croissance végétative et aptitude à la reproduction.

Qualité du fruit. Une amélioration pour la résistance au transport a été conduite par la sélection de variétés ayant un fruit à péricarpe épais.

Intérêt des plantes haploïdes chez le piment

L'haploïdie est une anomalie de la reproduction bien maîtrisée chez le piment. Ce phénomène est, d'une part spontané, avec l'apparition d'embryons jumeaux avec une fréquence de 0,1 %, et d'autre part inducible par culture d'anthères *in vitro*. Différentes améliorations dans la conduite de la culture d'anthères ont rendu cette technique fiable, quel que soit le génotype utilisé. L'haplodiploïdisation consiste à obtenir, en quantité importante, des plantes haploïdes puis, après doublement du stock chromosomique, des plantes haploïdes doublées (HD₀). Chaque plante haploïde doublée (donc homozygote) HD₀ peut produire des graines en quantité qui donneront, après semis, autant de lignées homozygotes HD₁, identiques à la plante HD₀. Cette possibilité conduit à intégrer des HD dans un schéma de sélection (on parle d'« haplométhode »). Pratiquée en routine par les établissements privés de sélection, l'haplodiploïdisation permet de fixer rapidement (en une génération) les caractères des lignées candidates à la participation à des combinaisons hybrides. Elle facilite également l'analyse des caractères de type oligogénique ou polygénique. Il devient, dès lors, possible de soumettre chaque lignée HD à une série de tests en utilisant autant de plantes que nécessaire (qui sont toutes homozygotes) : on peut ainsi analyser finement le mode de résistance ou d'adaptation à des agents pathogènes, des ravageurs ou des stress abiotiques dans des essais multi-locaux.

Méthodes utilisées

MÉTHODE D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Des mutants spontanés ont été détectés pour la couleur du fruit : fruit jaune et orange (délétion du gène de la capsantine capsorubine synthase) et pour sa saveur : fruit doux (délétions dans la chaîne métabolique de la capsaïcine).
Mutagenèse induite	ESSAIS Une dizaine de mutants mâles stériles ont été obtenus par irradiation ou par application de MSE. La plupart ne sont pas stables. OUI Un d'entre eux (<i>ms-3</i>) est utilisé en Bulgarie pour la production de semences hybrides F ₁ .
Croisements interspécifiques	OUI Les variétés, inscrites après les années 1980, résistantes aux souches du virus de la mosaïque du piment (PMMV, correspondant à des souches évoluées de virus de la mosaïque du tabac), contiennent un gène dont un allèle provient de <i>C. chinense</i> (L ³) ou de <i>C. chacoense</i> (L ⁴).

suite...

... suite

Les variétés françaises résistantes au CMV contiennent des QTL provenant de *C. baccatum* L. ('Osir', 'Florian',...). Ces croisements avec *C. baccatum* sont difficiles et nécessitent une étape de sauvetage *in vitro* des embryons.

Les variétés résistantes à la maladie bronzée de la tomate (TSWV) récemment inscrites, contiennent un gène *Tsu*, dont un allèle provient de *C. chinense*.

ESSAIS

Une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique a été obtenue par croisement interspécifique. Des problèmes de restauration partielle de fertilité limitent son utilisation dans la production de variétés hybrides F₁.

De nouveaux travaux sont menés pour introduire des caractères d'adaptation (par exemple, la tolérance au froid et l'aptitude à l'enracinement à partir de *C. baccatum* ainsi que la tolérance à la chaleur à partir de *C. chinense*).

Hybridation somatique AUCUNE

Élévation du niveau de ploïdie AUCUNE

Transgénèse EN COURS

1^{re} transformation. Les premières publications relatant la création de plantes transgéniques de piment datent de 1995.

Caractères travaillés. La transgénèse est utilisée pour introduire des résistances aux virus, notamment à celui de la mosaïque du concombre. La transgénèse ne semble pas une méthode d'amélioration prioritaire pour cette espèce.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative OUI

Le greffage est communément employé depuis les années 1960 pour multiplier les plantes sélectionnées à différentes étapes d'un schéma de sélection. Des programmes de sélection de porte-greffe ont récemment commencé pour la protection contre les parasites telluriques et comme alternative à la désinfection du sol par le bromure de méthyle, désormais interdite.

Sélection sanitaire AUCUNE

Haploïdisation OUI (cf. encadré ci-contre).

Des plantes haploïdes spontanées d'origine parthénogénétique sont repérées parmi des plantules jumelles.

La culture d'anthères *in vitro* permet d'induire la production d'un grand nombre de plantes haploïdes, quel que soit le génotype.

L'haplodiploïdisation est utilisée pour obtenir rapidement des lignées pures utilisées comme parents d'hybrides dans les schémas de sélection et pour faciliter l'analyse génétique des résistances polygéniques.

Recours à la stérilité mâle ESSAIS

Plusieurs systèmes sont connus (nucléaires récessifs ou nucléo-cytoplasmiques) obtenus par croisements interspécifiques ou par mutagenèse induite.

suite...

... suite

La stérilité mâle demeure peu utilisée pour la production de semences. En effet, celle qui conviendrait le mieux serait une stérilité mâle nucléaire récessive, ce qui entraînerait un coût de production des plantes jusqu'à la floraison et une incertitude dans le tri des plantes fertiles et stériles. La plus pratique à utiliser est encore la stérilité mâle nucléo-cytoplasmique car elle ne requiert pas de tri dans les lignées femelles.

OUI

Une stérilité nucléaire récessive obtenue par mutagenèse induite (MSE) est utilisée en Bulgarie pour la production de semences F₁. Une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique est utilisée en Chine, en Corée et en Inde pour la production de plusieurs hybrides F₁ pour le marché de frais et pour l'industrie. Mais, celle-ci manque de stabilité et conduit à tolérer quelques semences *inbreds* dans les lots de semences.

Recours à l'auto-incompatibilité

AUCUNE

L'auto-incompatibilité se rencontre uniquement chez les espèces sauvages.

Marquage moléculaire

OUI

Plusieurs cartes génétiques intra- et interspécifiques sont disponibles, les cartes de référence réalisées en France et à l'étranger ayant été intégrées.

Des marqueurs génétiques sont utilisés pour structurer la variabilité au sein de l'espèce cultivée et des espèces voisines.

Des marqueurs de la couleur du fruit à maturité (jaune/rouge), de la résistance à *Phytophthora capsici*, au CMV, à l'oïdium, de résistances aux potyvirus ainsi que des marqueurs des gènes *Tsu*, *Pvr2²*, *L*, *Me3*,... ont déjà été identifiés et sont en cours d'exploitation.

Deux banques BAC sont disponibles en France (INRA) et en Corée (université de Séoul).

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection

Sélection généalogique pour la fixation des lignées parentales.
Haplométhode

Sélection récurrente de populations pour favoriser les nombreuses recombinaisons nécessaires au transfert ou à l'amplification de caractères d'hérédité polygénique.

Types variétaux

Variété population

Variété lignée pure

Variété hybride F₁ (c'est le cas de la majorité des variétés inscrites depuis 1973). Les avantages des hybrides chez le piment sont multiples : possibilité de cumul de gènes, meilleure homéostasie et protection de la propriété. La castration manuelle est le procédé le plus utilisé pour la production de semences hybrides F₁. Néanmoins, il y a des variétés lignées pures inscrites au catalogue officiel qui ont une très bonne valeur agronomique.

Perspectives d'amélioration

Les programmes d'amélioration concernent essentiellement les cultures standardisées à grande échelle : cultures en serre et cultures de plein champ pour le marché et la conserve, cultures mécanisées pour la production de colorants.

En Europe occidentale, le succès des variétés hybrides à gros fruit, adaptées à la culture sous abri, a encouragé le secteur public et le secteur privé à poursuivre des recherches sur la lutte génétique contre les maladies et les ravageurs et sur la régularisation de la qualité et de la quantité de la production. Des recherches similaires et complémentaires sont poursuivies dans de nombreux pays en Amérique, Asie, Afrique, etc.

Contre les maladies à virus, les plus dommageables aux cultures de piment, des résistances complètes associées à des gènes majeurs sont utilisées. Face à l'apparition de souches virales de plus en plus virulentes, on tente de rassembler et d'amplifier tous les paramètres permettant de réduire l'incidence de la maladie dans les conditions réelles de culture afin de faire baisser le niveau d'infestation.

Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la richesse du piment en pigments, flavonoïdes et caroténoïdes, provitamines et vitamines, composés naturels qui auraient un rôle préventif contre plusieurs pathologies telles que les cancers, les maladies cardiovasculaires, l'ostéoporose et le vieillissement cellulaire.

La carte génétique du piment est bien avancée et les marqueurs moléculaires ont permis de caractériser nombre de gènes qui concernent des résistances aux maladies, le calibre et la couleur du fruit et bientôt sa composition en pigments et vitamines. Ces marqueurs sont utilisés pour suivre « à la trace » ces caractères agronomiques dans les croisements que réalisent les sélectionneurs. Ils permettent à ces derniers de choisir bien plus efficacement les associations de gènes utiles, contenus dans les variétés de différentes origines, et donc de mieux exploiter la variabilité naturelle.

Enfin, l'amélioration de cette espèce devrait aussi bénéficier des travaux de génomique entrepris chez la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), espèce phylogénétiquement proche, notamment en ce qui concerne la qualité du fruit.

Caractères à améliorer

Résistances aux bio-agresseurs. Du fait de l'internationalisation du marché des semences, il convient d'introduire des résistances aux bio-agresseurs des zones tropicales d'Amérique et d'Asie, par exemple, *Ralstonia* (anciennement *Pseudomonas*) *solanacearum*. Le développement de nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) combiné à l'interdiction depuis le 1^{er} janvier 2006 de la désinfection du sol à l'aide du bromure de méthyle risque de donner à ces parasites une importance plus grande que par le passé. Pour répondre à cet important défi, des programmes de sélection de porte-greffe ont été récemment engagés.

Une autre cause de destruction massive est liée à un champignon du sol, *Phytophthora capsici*, spécialement présent dans les cultures irriguées par gravité. Des résistances partielles (liées à plusieurs groupes de gènes) ayant seules été trouvées, leur transfert et l'accumulation de ces différentes résistances dans les divers types variétaux sont en cours à l'aide des outils de biologie moléculaire, ce qui devrait faciliter la tâche du sélectionneur.

Adaptation. Les variétés du futur devront pouvoir s'adapter à différents climats et à des systèmes diversifiés de culture. La résistance à la chaleur, aux contraintes hydriques et à la salinité sont des objectifs importants dans certains pays méditerranéens ainsi que dans les zones intertropicales (cultures d'été). La tolérance aux faibles niveaux énergétiques (température, lumière) est très recherchée pour les cultures en zone méditerranéenne en hiver ou en Europe du Nord.

Qualité du fruit. L'amélioration de la qualité gustative et de la durée de conservation est envisagée plus intensément à présent. Des travaux sont en cours pour sélectionner un fruit de couleur homogène en culture de jours courts pour le sud de l'Espagne. Par ailleurs, un programme de sélection pour l'architecture de la plante et la qualité du fruit se poursuit à l'université de Rehovot (Israël).

Méthodes à développer

Le marquage moléculaire est probablement la technique dont on attend le plus de retombées en terme de sélection :

- des marqueurs moléculaires à haut polymorphisme et des techniques de détection de polymorphisme au niveau d'un nucléotide (SNP) sont utilisés afin d'analyser finement la variabilité naturelle disponible ;
- le piment devrait bénéficier des connaissances acquises sur les espèces modèles de Solanacées (cartes physiques de synténie) ;
- les marqueurs moléculaires peuvent être d'une grande efficacité pour le transfert des résistances partielles cumulées d'un type variétal à un autre et pour la construction de nouveaux génotypes.

Inscription et protection des variétés en France

1952, ouverture du catalogue espèces potagères.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique particulière de variétés hybrides notamment dans la liste piment.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 123 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 749 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Cinq variétés étaient inscrites, en 2003, sur la liste des variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les études DHS réalisées par le GEVES, 43 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 cycles, avec un site d'observation. À l'issue de ces 2 cycles d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

- Ano G., Anaïs G. et Chidiac A.**, 2002. Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe. *Phytoma. Déf. Vég.*, 551, 36-37.
- Caranta C., Lefebvre V. et Palloix A.**, 1997. Polygenic resistance of pepper to potyviruses consists of a combination of isolate-specific and broad-spectrum quantitative trait loci. *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 10 (7), 872-878.
- Caranta C., Pflieger S., Lefebvre V., Daubèze A.-M., Thabuis A. et Palloix A.**, 2002. QTLs involved in the restriction of cucumber mosaic virus (CMV) long-distance movement in pepper. *Theor. Appl. Genet.*, 104 (4), 586-591.
- Chaux C. et Foury C.**, 1994. Piment. Dans : *Productions légumières*. Tec & Doc, Paris, tome 3, 271-300.
- Cook A.A. et Stahl R.E.**, 1963. Inheritance of resistance in pepper to bacterial spot. *Phytopathology*, 53, 1060-1062.
- Cook A.A.**, 1968. Virus resistance in some *Capsicum* species from South America. *Plant Dis. Rep.*, 52, 381-383.
- Dong C.Z., Jiang C.X. et Feng L.X.**, 1995. Transgenic tomato and pepper plants containing CMV sat-RNA cDNA. *Acta Hortic.*, 402, 78-86.
- Dumas de Vaulx R. et Pochard E.**, 1986. Parthénogenèse et androgenèse chez le piment. Rôle actuel dans les programmes de sélection. *Sél. Fr.*, 36, 3-16.
- Erard P., Bellamy A., Berry D., Buffière A., Capy A., Dumoulin J., Guillou A., Hutin C. et Izard D.**, 2002. *Le poivron*. Ctifl éd., Paris, 156 p.
- Gry L.**, 1991. Poivron ou piment, la sélection est très forte. *Semences Prog.*, 69, 16-29.
- Lefebvre V., Goffinet B., Chauvet J.-C., Caromel B., Signoret P., Brand R. et Palloix A.**, 2001. Evaluation of genetic distances between pepper inbred lines for cultivar protection purposes : comparison of AFLP, RAPD and phenotypic data. *Theor. Appl. Genet.*, 102 (5), 741-750.
- Lefebvre V., Palloix A., Caranta C. et Pochard E.**, 1995. Construction of an intraspecific integrated linkage map of pepper using molecular markers and doubled-haploid progenies. *Genome*, 38 (1), 112-121.

- Messiaen C.-M., Blancard D, Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies de la tomate, de l'aubergine et du poivron. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*. INRA Éditions, Paris, 141-214.
- Palloix A., Daubèze A.-M., Phaly T. et Pochard E.**, 1990. Breeding transgressive lines of pepper for resistance to *Phytophthora capsici* in a recurrent selection system. *Euphytica*, 51, 141-150.
- Palloix A., Daubèze A.-M., Chaîne C. et Pochard E.**, 1990. Sélection pour la résistance aux virus chez le piment. *Sél. Fr.*, 41, 79-90.
- Palloix A., Daubèze A.-M. et Pochard E.**, 2003. Piments. Dans : *Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 278-290.
- Péron J.-Y.**, 1999. Le piment doux. Dans : *Productions légumières, références*. Éditions Synthèse agricole, Bordeaux, 449-459.
- Pflieger S., Palloix A., Caranta C., Blattes A. et Lefebvre V.**, 2001. Defense response genes cosegregate with quantitative disease resistance loci in pepper. *Theor. Appl. Genet.*, 103 (6/7), 920-929.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Pochard E.**, 1977. Localisation of genes in *Capsicum annuum* L. by trisomic analysis. *Ann. Amélior. Plant.*, 27, 255-266.
- Pochard E. et Daubèze A.-M.**, 1989. Progressive construction of a polygenic resistance to cucumber mosaic virus in the pepper. 7th *Eucarpia meeting on genetics and breeding of Capsicum and eggplant*. Kragujevac, 187-192.
- Pochard E., Palloix A. et Daubèze A.-M.**, 1992. Le piment. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 420-434.
- Rast A.T.B.**, 1982. Resistance of *Capsicum* species to tobacco, tomato, and pepper strains of tobacco mosaic virus. *Neth. J. Plant Pathol.*, 88, 163-169.
- Shin R., Han J.H., Lee G.J. et Peak K.H.**, 2002. The potential use of a viral coat protein gene as a transgene screening marker and multiple virus resistance of pepper plants coexpressing coat proteins of cucumber mosaic virus and tomato mosaic virus. *Transgenic Res.*, 11 (2), 215-219.

Le pin maritime

Pinus pinaster Ait. ($2n = 2x = 24$)
(Conifères)

Présentation de l'espèce

L'aire naturelle du pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., est morcelée, peu étendue et répartie dans les pays du pourtour méditerranéen (France, Portugal, Espagne, Italie, Maroc, Algérie et Tunisie). En France, c'est en Aquitaine que se trouve le plus grand peuplement.

L'évolution des peuplements de pin maritime en Aquitaine est fortement liée à son utilisation par l'homme. Cette espèce était présente dans la région, dès l'époque boréale (– 9 000 ans), sur les dunes anciennes, en mélange avec les chênes (*Quercus* spp.). Les changements climatiques furent ensuite progressivement plus favorables aux pins. Dans l'Antiquité, les pins peuplaient les zones littorales en mélange avec les feuillus, les forêts-galeries le long des rivières. La gomme (résine) était extraite du pin maritime et servait alors à entretenir les cordages et à calfater les navires. Plus tard, au Moyen Âge, la résine fut utilisée pour fabriquer des chandelles.

À cette époque, les dunes modernes se construisaient dans une dynamique active. Poussées par le vent et l'océan, les dunes avançaient en moyenne de 6 mètres par an, menaçant parfois des lieux habités, empêchant les cours d'eau de s'écouler vers la mer et entraînant la formation d'un cordon de lacs littoraux. Cette situation dura jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. Les frères Desbiey furent alors les précurseurs des techniques de fixation des dunes : ils employèrent l'oyat (*Psamma arenaria* Roem & Sch., anciennement *Ammophila arenaria* Link), petite graminée au système racinaire important. Le pin maritime fut ensuite planté sur les versants orientaux des dunes, de manière à les fixer durablement. Nicolas Brémontier, chargé par l'administration royale d'arrêter la progression des dunes entre Arcachon et Pyla (Gironde), fit de nombreux semis de pin de 1786 à 1793. Une fois la progression des dunes stoppée, il restait encore à assainir et à boiser les 700 000 hectares de plaine inondée toute l'année, sauf l'été. L'assainissement des Landes fut amorcé par Jules Chambrelent. Ces

résultats enthousiasmèrent Napoléon III qui imposa aux communes, par la loi de 1857, de reboiser leurs « vacants », c'est-à-dire des terres incultes non boisées. Les terres drainées furent boisées avec le pin maritime, essence s'accommodant bien des sols landais hydromorphes et pauvres.

Durant la guerre de Sécession, entre 1861 et 1864, donc à cette même époque, la source de résine provenant des États-Unis se tarit. Cet événement favorisa l'activité économique de la région qui s'orienta alors majoritairement vers l'exploitation du pin maritime pour le gemmage (récolte de la résine après incision de l'écorce jusqu'aux tissus vivants). C'est ainsi qu'entre 1860 et 1930, la forêt landaise atteignit sa surface (encore actuelle) de près de 1 million d'hectares. Les graines utilisées à cette époque pour le boisement étaient récoltées localement, à proximité des arbres fructifères et faciles à atteindre. La résine servait à de multiples usages tels que la fabrication d'essence de térébenthine et de colophane. Un autre débouché important des forêts de pin maritime a été la production de poteaux de mines, notamment pour le Royaume-Uni et le Maghreb. Enfin, à partir de 1920, le pin maritime a aussi servi à alimenter l'industrie papetière. Avec la concurrence des résines portugaise et chinoise et l'arrivée des produits pétroliers, la production de résine dans les Landes s'est progressivement réduite jusqu'à son arrêt total dans les années 1970.

Le pin maritime est une espèce pérenne, allogame, à pollinisation anémophile, multipliée par semences. Le pin maritime fait l'objet d'une sylviculture intensive principalement en Aquitaine, ainsi qu'au sud-ouest de l'Australie où il a été introduit, et de façon moins intensive dans certaines zones du Portugal et de l'Espagne.

Pour les peuplements naturels (en France essentiellement : littoral landais, Sud-Est et Corse), un réseau de conservation des ressources génétiques *in situ* est en cours de mise en place. Le choix des ressources à conserver est basé sur l'évaluation de la diversité génétique *via* les marqueurs moléculaires, ainsi que sur la caractérisation morpho-adaptative des provenances.

Production et utilisation

Actuellement, le pin maritime est cultivé pour produire du bois, aussi les produits récoltés sont le fût (ou tronc).

En 2005, il couvrait une surface d'environ 3 millions d'hectares en Europe. En France, le pin maritime est la première essence résineuse en surface avec environ 1,36 million d'hectares dont presque 1 million pour le seul domaine forestier d'Aquitaine. Le pin maritime est aussi une espèce forestière importante en Espagne et au Portugal. Le pin maritime est apprécié pour sa forte croissance sur des sols pauvres et acides qu'il permet de valoriser en produisant du bois.

En Aquitaine, une pinède est installée pour une cinquantaine d'années. Après labour et fertilisation phosphatée, les pins sont semés ou plantés en ligne. Les

parcelles sont régulièrement entretenues (dégagements mécaniques entre les lignes). On procède à 4 ou 5 éclaircies entre 12 et 35 ans (dont les dernières produisent déjà un revenu par la vente du bois), de manière à obtenir 250 à 350 pins à l'hectare qui seront exploités à la coupe rase (c'est-à-dire par la récolte finale de tous les arbres restants). Les arbres, alors arrivés à maturité, peuvent être employés aux meilleurs usages.

Le bois d'œuvre, qui provient de la partie inférieure du tronc de l'arbre, est bien valorisé financièrement. Il est réservé au sciage (bois de charpente, parquets, lambris et ameublement, pour les meilleures qualités ; caisserie et fabrication d'emballages et de palettes pour les qualités inférieures) et au déroulage (contre-plaqué).

Le bois d'industrie est constitué des parties supérieures du tronc à faible diamètre et de celles présentant des défauts (manque de rectitude, présence de nœuds ou d'attaques de champignon,...). Ce type de bois est utilisé en trituration par les industries de fabrication des panneaux de particules, de fibres ou de pâte à papier.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés

Les variétés portent, en général, le nom du lieu d'installation du verger à graines destiné à la production de semences. Il ne s'agit pas de variétés au sens réglementaire.

Vergers de première génération

1975, '**Saint Sardos**' (INRA, France), variété synthétique de clones appartenant à la génération « zéro » (G_0) du programme d'amélioration conduit en France. C'est la première variété de pin maritime et elle repose sur une base génétique très large. En 20 ans, ce verger de clones a permis de produire assez de semences pour reboiser 40 000 ha.

1987, '**Sore**', '**Cabanac**' et '**Lavercantière**' (INRA, France), variétés synthétiques de familles appartenant à la première génération (G_1) du programme d'amélioration conduit en France. Elles se distinguent par une augmentation de volume de bois produit de l'ordre de 15 % et par une amélioration sensible de la rectitude du tronc. Entre 1987 et 1995, 32 000 ha ont étéensemencés avec la variété 'Sore' et plus de 65 000 ha avec la variété 'Cabanac'. Ces vergers à graines ne sont pratiquement plus récoltés depuis 2000, la seconde génération de vergers à graines étant arrivée en production.

1990, '**LC1**' (AFOCEL, France), variété synthétique de clones se distinguant par son caractère « hybride » entre provenances landaises et corses. Cette variété allie la productivité, la vigueur et la résistance au froid des provenances landaises

avec la rectitude du tronc et la finesse des branches des provenances corses. La réglementation limite la diffusion de cette variété (80 ha/an), au nom du principe de précaution. Ainsi, l'introduction de matériel corse dans la forêt landaise est lente et contrôlée.

Vergers de seconde génération

1993, '**Moulis**', '**Beychac**' et '**Le Porge**' (AFOCEL, France), variétés synthétiques de clones G_0 élités avec pollinisation contrôlée (croisements contrôlés, puis multiplication par bouturage). Il s'agit des premiers vergers de pin maritime avec un nombre de clones inférieur à une centaine. Le gain génétique espéré est de + 30 % pour le volume et la rectitude du tronc. Aujourd'hui, ces vergers ne sont plus exploités car les vergers dits polycross (*cf.* ci-dessous), dont le gain génétique est de même niveau avec un coût moindre (pollinisation libre), sont entrés en production.

1995, '**Vaquey**' (AFOCEL, France), variété synthétique de clones élités G_1 .

1999, '**Mimizan**', '**Hourtin**' et '**Saint Augustin**' (INRA, France), variétés synthétiques de familles G_1 élités. Il s'agit de vergers dits polycross. Le nombre de clones est inférieur à une centaine, ce qui a permis un fort gain génétique.

Remarque. Les variétés de seconde génération sont basées sur l'utilisation d'une base génétique plus étroite (par rapport à celle de la première génération) : elles sont constituées d'un nombre réduit de géniteurs sélectionnés par tests de descendance pour leur bonne aptitude générale à la combinaison. Ces variétés permettent de doubler les gains génétiques obtenus avec la première génération de vergers (*cf.* encadré ci-contre).

Le programme de sélection du pin maritime en France, visant à fournir des variétés améliorées pour les conditions de sylviculture de l'Aquitaine, s'est basé sur la provenance locale landaise, la plus résistante au froid. Ce programme essaie de concilier progrès génétique et maintien de la diversité génétique. Il se base sur une population de 635 « arbres plus » G_0 (c'est-à-dire d'arbres sélectionnés en forêt pour leur valeur phénotypique supérieure à celle de leurs voisins), qui a été échantillonnée de manière à représenter l'ensemble de la variabilité contenue dans la population landaise. Les variétés de première génération sont composées d'environ 200 géniteurs et, ceux de la deuxième génération, d'une quarantaine de géniteurs, ce qui permet de garder une bonne variabilité intraspécifique. Les études théoriques indiquent qu'une quarantaine de géniteurs est suffisante pour garantir à la variété une bonne variabilité lui permettant de résister face à l'apparition de nouveaux stress.

Conséquences de la tempête sur la production de semences améliorées

La tempête de décembre 1999 qui a eu de multiples conséquences, notamment sur la forêt française, a eu un impact important sur les vergers à graines mis en place à partir de la sélection faite par l'INRA ou l'AFOCEL, sous la direction scientifique et technique du Cemagref :

- 90 ha des vergers à graines de première génération ont été détruits, soit 37 % des surfaces de production, 156 ha restent opérationnels, mais ne sont plus récoltés ;
- 40 ha des vergers à graines de deuxième génération ont été détruits, soit 20 % des surfaces de production, 157 ha restent opérationnels. Les plus gros dégâts ont eu lieu à Hourtin (verger situé en Gironde, détruit à 50 %) et à Vaquey (verger situé également en Gironde, entièrement détruit).

Sachant que la première génération de vergers n'est plus récoltée depuis 2000 (les pépiniéristes landais utilisent des semences issues de la seconde génération de vergers) et que les vergers de pollinisation contrôlée ne sont plus utilisés depuis 1997 pour produire des graines landaises, on peut estimer que la capacité potentielle de production de la deuxième génération est de 2,5 à 3,5 tonnes de graines par an.

Regard sur 50 ans de sélection

La création variétale dans le cas du pin maritime est longue. Il faut, d'une part 7-8 ans pour qu'il arrive à maturité sexuelle, et d'autre part, environ 10-15 ans pour pouvoir estimer son volume à 50 ans, cible de la sélection.

Le pin maritime a d'abord été utilisé pour la production de résine au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. Au fur et à mesure des éclaircies dans les peuplements gemmés, les forestiers et les gemmeurs conservaient plutôt les arbres droits, plus faciles à résiner, mais on ne peut pas parler réellement de sélection pour la résine.

La sélection du pin maritime pour la production de bois est probablement une des plus anciennes et des plus avancées en ce qui concerne les espèces forestières. Ainsi, le premier arboretum de pin maritime « Les Arrouilles » a été installé à Mimizan (Landes) en 1926. Avec le premier test de provenances de l'aire naturelle, la constitution de cet arboretum a été une étape préliminaire importante à l'amélioration génétique du pin maritime. La sélection en France s'est attachée à améliorer le pin maritime d'origine landaise qui est remarquable pour sa capacité à croître sur des sols pauvres et hydromorphes, pour son excellente faculté de croissance en volume et pour sa résistance au froid, mais par contre, dont le tronc manque souvent de rectitude et dont la branchaison présente de nombreux défauts. Il a fallu attendre la fin des années 1950 pour que s'installe la Station INRA de Recherches de Pierroton-Cestas (Gironde) au sein de laquelle les premiers véritables travaux de sélection furent commencés. L'objectif principal a d'abord été de gagner en rectitude et en volume afin de faire faire à la production de bois un bond à la fois quantitatif et qualitatif. La première génération, puis la deuxième génération de sélection ont fait apparaître de nouveaux types variétaux utilisant des géniteurs sélectionnés.

Le progrès se poursuit actuellement, notamment grâce à la création du Groupe pin maritime du futur en 1995, sous l'impulsion de l'AFOCEL, de l'INRA, du Centre de la productivité forestière d'Aquitaine (CPFA) et de l'ONF, avec le soutien financier de l'Union européenne, du ministère de l'Agriculture et du Conseil régional d'Aquitaine.

Il y a 50 ans, il n'existait pas de peuplements améliorés. Aujourd'hui, environ 10 % de la forêt des Landes, qui couvre 1 million d'ha, est occupée par des variétés améliorées.

La France n'est pas le seul pays à sélectionner le pin maritime. Un programme important de sélection, mené en Australie, est basé sur l'utilisation de pins maritimes d'origine portugaise qui allient bonne vigueur et bonne branchaison.

Caractères importants améliorés

Volume de bois. La production de bois de pin maritime était d'environ 4 m³/ha/an en 1950. L'amélioration des pratiques culturales a permis d'atteindre un rendement de 8 m³/ha/an en 1980. Les variétés de la première sélection se distinguent par un gain en volume de 15 % par rapport aux peuplements non améliorés. Pour la seconde génération, l'observation de sujets d'une quinzaine d'années permet d'estimer un gain de volume de près de 30 %.

Forme de l'arbre. Des variétés avec un tronc plus rectiligne ont été sélectionnées. Les variétés de la première génération de sélection présentent un gain de rectitude de 15 % par rapport à celui des variétés non améliorées. De plus, bien que ces critères n'aient pas été intégrés dans les index de sélection, le pourcentage d'arbres présentant une bonne branchaison et celui d'arbres sans défaut sont, tous les deux, augmentés de 10 % dans les variétés de première génération par rapport aux peuplements non améliorés. Dans les variétés de seconde génération, le gain en rectitude estimé est proche de 30 % par rapport aux peuplements non améliorés.

Gain financier. Entre 1980 et 2000, 80 000 ha de pin maritime apportant un progrès génétique d'au moins 10 % en volume et en rectitude ont été plantés. Dans des conditions de culture traditionnelle, un gain de plus de 1,8 million de m³ de bois peut être espéré. Si la plus-value, pour du bois ayant une rectitude améliorée de 10 %, est estimée à 10 %, la valorisation économique du reboisement avec des variétés améliorées pourrait atteindre plus de 66,4 millions d'euros.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	AUCUN
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgénèse	EN COURS La transgénèse a été réalisée la première fois dans le genre <i>Pinus</i> L. au milieu des années 1990. Cependant, la transformation génétique du pin maritime n'est pas encore complètement maîtrisée et l'introduction d'arbres génétiquement modifiés (AGM) en forêt n'est pas envisagée à court terme, ni par les acteurs de la sélection, ni par la filière professionnelle.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	Le bouturage peut être utilisé sur des plants en première saison de végétation. Le coefficient de multiplication est alors de 5. Le greffage de rameau est utilisé pour sauvegarder le matériel sélectionné et pour multiplier les clones qui vont servir à l'installation des vergers de clones. Les variétés, dont la production de semences est assurée dans des vergers de clones issus de multiplication végétative, présentent le défaut d'être coûteuses et longues à installer, mais possèdent l'avantage d'entrer en production de semences très rapidement. Les premiers embryons somatiques de pin maritime ont été obtenus en 1995 (à partir d'embryons zygotiques immatures). Il reste à améliorer la technique.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	L'analyse des terpènes (hydrocarbures présents dans la résine des tissus corticaux) à partir d'aiguilles échantillonnées sur une trentaine d'arbres par peuplement permet, depuis 1989, de certifier l'origine landaise des peuplements. L'étude de la diversité des populations naturelles à l'aide des microsatellites est en cours. Une carte génétique saturée est désormais disponible et de nombreux QTL y sont déjà localisés. Une approche de type « gène candidat » est en cours et la sélection assistée par marqueurs est envisagée.

suite...

... suite

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas
de sélection

Sélection massale. Dans les années 1960, un programme de sélection massale, mené dans l'ensemble du Massif aquitain, a permis de créer une population d'amélioration composée de 380 « arbres plus ». D'autres campagnes de sélection ont conduit à un agrandissement de cette population qui contient actuellement plus de 635 « arbres plus » G_0 .

Sélection récurrente. Une sélection récurrente est effectuée dans la population d'arbres G_0 avec des intercroisements contrôlés selon des schémas factoriels ou hiérarchiques. Une sélection multi-caractères sur index combiné individu/famille est réalisée. À chaque cycle, il est possible de sélectionner des clones sur leur aptitude générale à la combinaison ou des familles issues de ces clones pour produire une variété synthétique.

Types variétaux

Variété synthétique de clones. Les vergers à graines de ce type sont constitués de copies végétatives d'arbres sélectionnés. Par exemple, la variété 'Saint Sardos' est constituée de 300 copies d'« arbres plus » G_0 . Une éclaircie génétique peut être pratiquée dans ce type de verger lorsque les aptitudes générales à la combinaison des clones du verger sont connues (évaluées en tests de descendance).

Variété synthétique de familles. Les vergers à graines de ce type sont obtenus en semant des graines issues de croisements contrôlés entre parents sélectionnés. Les variétés 'Sore', 'Cabanac' et 'Laverantière' ont été élaborées à partir de 1 800 familles provenant de croisements contrôlés entre 300 « arbres plus » G_0 . Une ou plusieurs éclaircies génétiques sont pratiquées dans ces vergers lorsqu'ils sont en âge d'être évalués.

Variété synthétique de clones en pollinisation contrôlée. Les vergers à graines de ce type sont constitués de copies végétatives d'arbres élités. Les arbres élités (les meilleurs des « arbres plus » G_0) sont caractérisés par une forte valeur génétique héritable qui a été vérifiée par tests de descendance. Les variétés 'Moulis', 'Beychac', 'Le Porge', ont été créées à partir d'une quarantaine d'arbres élités G_0 . Dans ce type de verger, la pollinisation est contrôlée. La variété 'LC1' est particulière car les clones utilisés en tant que pères sont d'origine corse.

Variété synthétique de clones d'arbres élités. Ce type variétal est très similaire au précédent, la seule différence étant que la pollinisation est libre. Cette structure variétale est adoptée pour des variétés performantes australiennes ('Joandalup', 'Mullalo', 'Manjimup') et française ('Vaquay').

Variété synthétique de familles polycross. Les vergers à graines de ce type sont constitués à partir de croisements entre une trentaine d'arbres élités. Les arbres élités sont caractérisés par une forte valeur génétique héritable qui a été vérifiée par tests de descendance. Les variétés 'Mimizan', 'Hourtin' et 'Saint Augustin' ont été constituées à partir de 34 arbres élités G_0 .

Perspectives d'amélioration

Actuellement, la seule concurrence réelle pour le pin maritime français vient des bois produits dans le nord de l'Europe, ceux produits dans les autres pays n'arrivant pas sur le marché français.

Par ailleurs, les besoins en graines de pin maritime en France s'accroissent du fait de l'augmentation de l'exploitation du bois par abaissement de la durée de rotation et des dégâts causés par la tempête de décembre 1999. Ainsi, 100 000 ha de forêt landaise sont à reconstituer alors que la tempête a réduit le potentiel de production de graines.

Le programme de sélection, en proposant une troisième génération de variétés améliorées, contribue à la reconstitution de la forêt de pins maritimes des Landes de Gascogne, et à sa compétitivité. Cette troisième génération de vergers a commencé à être implantée en 2002-2003, et entrera en production vers 2010. L'utilisation de géniteurs améliorés (arbres G_1 , dont l'aptitude générale à la combinaison a été testée) laisse présager que ces variétés seront encore plus performantes que les précédentes. La quatrième génération de vergers, en cours d'élaboration, devrait permettre, en outre, d'élargir la gamme des variétés proposées. De nouveaux critères de sélection tels que la qualité du bois ou la sensibilité aux bio-agresseurs seront considérés. La sélection du pin maritime s'oriente vers la création de variétés plus homogènes, plus diversifiées et à variabilité interne plus réduite, qui seront renouvelées plus fréquemment.

La valorisation économique prévue du progrès génétique dans les 20 ans à venir s'échelonne entre 500 (lorsque le pourcentage de reboisement avec des variétés améliorées était de 50 %, ceci en 1999, avant la tempête) et 800 millions d'euros (lorsque le pourcentage de reboisement avec des variétés améliorées sera de 80 %).

Caractères à améliorer

Compromis vigueur / forme. Il existe une corrélation génétique négative entre la vigueur et la rectitude du tronc, aussi les variétés classiques présentent le meilleur compromis possible entre ces deux caractères. Les variétés de troisième génération seront de deux types :

– *compromis équilibré entre les deux caractères.* Une variété 'VF3' a été créée à partir de géniteurs ayant tous subi un cycle d'amélioration (G_1) et ayant tous été testés pour leur aptitude générale à la combinaison par tests de descendance. Le gain génétique espéré de la variété 'VF3', est de plus de 40 % sur le volume du bois et de 35 % en rectitude du tronc, par rapport aux peuplements non améliorés. Cette variété pourra être produite sous forme de vergers à graines de clones élites en pollinisation libre ou de vergers à graines de familles polycross ;

– *compromis favorisant la forme de l'arbre.* Certains terrains sont plus riches que la moyenne en Aquitaine. Pour ce type de sol, le caractère le plus important pour une variété de pin maritime est la forme (rectitude du tronc, bonne branchaison, absence de défaut), la croissance étant moins limitante. La variété 'LC2' sera composée par croisements contrôlés entre 25 géniteurs d'origine landaise, et 25 autres d'origine corse. Les géniteurs corses ont été aussi sélectionnés pour leur

tolérance au froid, à la pyrale du tronc et à la cochenille. Les gains attendus en vigueur et en rectitude devraient atteindre 40 %. De plus, la branchaison devrait aussi être considérablement améliorée. Cette variété devrait être produite sous forme de vergers de clones avec pollinisation contrôlée.

Qualité du bois. Des critères tels que la densité du bois sont à l'étude.

Résistance aux bio-agresseurs. Des variétés de la 3^e, mais surtout de la 4^e génération, vont probablement acquérir de moindres sensibilités à certains bio-agresseurs.

Pyrale du tronc (*Dioryctria spendidella*). Ce ravageur est un lépidoptère dont les larves creusent des galeries dans le tronc. L'arbre est fragilisé et est susceptible de casser sous l'action du vent ou d'être victime d'agents pathogènes secondaires. Il n'existe aucune méthode de lutte contre ce bio-agresseur. Un critère de sélection indirecte pour la résistance (teneur en terpinolène) est à l'étude. La pyrale adulte, semble, en effet, choisir pour y pondre ses œufs, les arbres les plus fortement « émetteurs » de terpinolène (caractère qui serait lié à la fois à une forte teneur en terpinolène de la résine, et à une forte croissance radiale de l'arbre, provoquant des fissures dans l'écorce et libérant plus de composés volatiles). La sélection indirecte pour la résistance à la pyrale du tronc consisterait donc à retenir les arbres dont la résine présente une faible teneur en terpinolène.

Cochenille (*Matsucoccus feytaudi*). Ce ravageur a décimé les populations de pin maritime du sud-est de la France. Pour cette région, une variété est en cours de création à partir d'une population de l'est de l'Espagne qui présente une bonne résistance à ce bio-agresseur. La variété devrait aussi se caractériser par une rectitude du tronc, une résistance à la sécheresse et une vigueur supérieures à celles des anciennes populations locales. Pour l'Aquitaine, les géniteurs de provenance landaise et toutes les variétés qui en dérivent sont résistants. Le problème ne se pose que pour les combinaisons Landes × Corse car les géniteurs d'origine corse sont en moyenne plus sensibles. Une méthode de sélection indirecte est là-aussi en cours d'évaluation, basée sur l'épaisseur d'écorce et la présence de certains phénols dans le liber.

Armillaire (*Armillaria obscura*). Ce champignon est le bio-agresseur qui cause les dégâts les plus inquiétants pour la forêt landaise, car il est capable de persister de nombreuses années dans une parcelle infectée. Il s'attaque aux racines et à la base du tronc et provoque la mort de l'arbre. Les études portent sur le mode d'infection de cet agent pathogène et sur la variabilité de résistance entre provenances.

Rouille courbeuse (*Melampsora pinitorca*). Ce champignon s'attaque aux pousses en élongation sur le jeune pin et provoque des déformations irrémédiables du tronc. Un test en laboratoire sur rameaux excisés permet de déterminer la sensibilité des clones de pin maritime. Ce test est maintenant appliqué aux géniteurs des futures variétés, de façon à éliminer les clones les plus sensibles.

Méthodes à développer

Les vergers de 4^e génération devraient pouvoir bénéficier des avancées réalisées dans le domaine du marquage moléculaire, ce qui permettra de choisir plus efficacement les futurs géniteurs (sélection assistée par marqueurs basée sur une approche de type « gène candidat », en cours d'étude).

Réglementation sur les matériels forestiers de reproduction (MFR) en France

1857, loi imposant aux communes d'assainir et de reboiser leurs terres vacantes en Aquitaine.

1971, arrêté sur les Matériels forestiers de reproduction (MFR). Réglementation garantissant la qualité génétique et phénotypique des MFR, pour l'interdiction des récoltes de graines en dehors des matériels de base admis, c'est-à-dire inscrits sur le registre national, et pour la création des premiers peuplements classés.

1989, arrêté ministériel inscrivant le pin maritime sur la liste des espèces concernées par la loi de 1971.

1999, directive européenne concernant la commercialisation des matériels forestiers de reproduction, s'appliquant à 51 essences forestières, dont 47 utilisables en France, contre 15 précédemment (y compris le pin maritime).

2003, règlement sur la commercialisation des matériels forestiers de reproduction, transcrivant la nouvelle directive européenne au droit français (Code forestier).

La distinction des variétés synthétiques de pin maritime entre elles est souvent impossible, aussi il n'existe ni catalogue, ni COV. Cependant, il existe un registre national des matériels de base soumis à la réglementation européenne, et leur qualité génétique est certifiée par l'État. Ce dernier garantit leur provenance (délivrance d'un certificat maître par les contrôleurs assermentés du Service Forêt Bois (SERFOB, à la Direction régionale de l'agriculture et de la forêt (DRAF)) ou de l'ONF lors des récoltes (établissement d'un document officiel par le fournisseur lors de la commercialisation). Le Cemagref assure un appui technique au ministère de l'Agriculture : sélection des peuplements porte-graines, définition des régions de provenances, mise à jour du registre national des matériels de base des essences forestières, instruction des dossiers pour le CTPS, etc.

Le pin maritime n'a été proposé pour inscription sur la liste des espèces concernées par l'arrêté de 1971 qu'en 1989, suite à l'hiver très froid de 1985 qui ravagea 30 000 ha de pins dans les Landes. En effet, il s'est avéré que 95 % des pins maritimes détruits par le froid étaient originaires du Portugal. Les semences portugaises avaient été importées en période de pénurie de graines pour le reboisement des Landes, notamment après les grands incendies de 1949-1950.

Depuis 1989, non seulement l'arrêté de 1971 est appliqué au pin maritime, mais aussi un test terpénique permettant de certifier l'origine landaise du peuplement est exigé lors de toute récolte commerciale de graines. Par principe de précaution et pour préserver l'équilibre de la forêt landaise, la diffusion des variétés possédant des géniteurs non indigènes ('LC1') est aussi limitée et contrôlée par une réglementation rigoureuse.

Par ailleurs, la directive européenne de 1999 sur la commercialisation des Matériels forestiers de reproduction s'applique en France, notamment pour le pin maritime. Cette directive distingue quatre catégories de matériels : catégorie Source Identifiée (région de provenance), catégorie Sélectionnée (peuplement classé), catégorie Qualifiée (verger à graines avant homologation), et catégorie Testée (verger à graines homologué). Les vergers à graines sont inscrits au registre par l'autorité désignée (ministère de l'Agriculture sur avis du CTPS). Ils sont ensuite homologués par la même autorité, lorsqu'ils ont fait la preuve de leur supériorité génétique par rapport à des témoins connus, dans un test d'homologation installé à cette fin, et suivant un protocole réglementaire.

Pour en savoir plus

- Alazard P. et Raffin A.**, 2002. Des gains génétiques toujours plus importants. *Forêt Entr.*, 148, 26-30.
- Alazard P. et Raffin A.**, 2002. Avec la 3^e génération de vergers, des nouvelles variétés encore plus performantes pour 2010. *Forêt Entr.*, 148, 34-37.
- Alazard P., Raffin A. et Pastuszka P.**, 2002. Les variétés actuelles de pin maritime. *Forêt Entr.*, 148, 23-25.
- Arbez M.**, 1987. *Les ressources génétiques forestières en France*. Tome 1. *Les Conifères*. INRA Éditions / BRG, Paris, 236 p.
- Baradat P., Marpeau-Bezard A. et Bernard-Dagan C.**, 1984. Les terpènes du pin maritime, aspects biologiques et génétiques. VI. Estimation du taux moyen d'autofécondation et mise en évidence d'écarts à la panmixie dans un verger à graines de semis. *Ann. Sci. For.*, 41 (2), 107-134.
- Baradat P. et Pastuszka P.**, 1992. Le pin maritime. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*, A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 695-709.
- Crémière L., Alazard P., Merzeau D. et Daubet A.**, 2002. La filière semences améliorées, aujourd'hui en Aquitaine. *Forêt Entr.*, 148, 31-33.
- Dorlanne D.**, 1984. La forêt de Gascogne à la veille du 3^e millénaire. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 70 (9), 3200-3208.
- Groupe Pin Maritime du Futur**, 2002. *Le progrès génétique en forêt*. INRA, Domaine de Pierroton, Cestas, 80 p.
- Illy G.**, 1966. Recherches sur l'amélioration génétique du pin maritime. *Ann. Sci. For.*, 23, 757-948.
- Lesgourgues Y.**, 2002. Un impact économique significatif. *Forêt Entr.*, 148, 41-43.
- Mariette S., Chagne D., Lezier C., Pastuszka P., Raffin A., Plomion C. et Kremer A.**, 2001. Genetic diversity within and among *Pinus pinaster* populations : comparison between AFLP and microsatellite markers. *Heredity*, 86 (4), 469-479.
- Merzeau D., Daubet A., Canteloup D., Raffin A., Pastuszka P. et Alazard P.**, 2002. Vers une 4^e génération de vergers. *Forêt Entr.*, 148, 38-40.

- Pastuszka P., Raffin A. et Alazard P.**, 2002. Un programme de pointe ! *Forêt Entr.*, 148, 19-22.
- Plomion C., Bahraman N., Durel C.E., O'Malley D.M. et Kremer A.**, 1995. Genetic dissection of phenotypic traits in maritime pine using RAPD and protein markers. *Somatic cell genetics and molecular genetics of trees / Forestry sciences*, 49, 223-231.
- Plomion C., Hurme P., Frigerio J.M., Ridolfi M., Pot D., Pionneau C., Avila C., Gallardo F., David H. et Neutelings G.**, 1999. Developing SSCP markers in two *Pinus* species. *Mol. Breed.*, 5 (1), 21-31.
- Raffin A.**, 2002. Préserver la diversité des ressources génétiques. *Forêt Entr.*, 148, 44-45.
- Ribeiro M.M., Mariette S., Vendramin G.G., Szmidt A.E., Plomion C. et Kremer A.**, 2002. Comparison of genetic diversity estimates within and among populations of maritime pine using chloroplast simple sequence repeat and amplified fragment length polymorphism data. *Mol. Ecol.*, 11 (5), 869-877.
- Riou-Nivert P.**, 2002. Le pin maritime, seigneur d'Aquitaine. *Forêt Entr.*, 148, 47-51.
- Rousselet C., Bilger I., Héois B. et Ginisty C.**, 2003. Conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction. Régions de provenance – variétés améliorées. Ministère chargé des Forêts – Cemagref, Paris, 174 p.
- Tessier du Cros E. et Bastien C.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres forestiers. *Sél. Fr.*, 53, 103-114.

Le poirier

Pyrus communis L. ($2n = 2x = 34$)
(Rosacées)

et ses porte-greffe poirier et cognassier

Pyrus communis L. ($2n = 2x = 34$)
et *Cydonia oblonga* Mill. ($2n = 2x = 34$)

Présentation de l'espèce

Le poirier *Pyrus communis* L., comme les autres espèces d'arbres fruitiers à pépins, appartient à la sous-famille des Maloïdées qui est caractérisée par un nombre chromosomique de base $x = 17$ au lieu de 7, 8 et 9 pour les autres sous-familles de Rosacées. Elle est probablement issue d'une allopolyploïdisation entre des espèces d'arbres fruitiers à noyau (sous-famille des Prunoïdées) et des espèces de spirées (sous-famille des Spiréoïdées). Il existe des poiriers sauvages dans toute l'Eurasie. En Europe, il s'agit surtout de *Pyrus communis* L. subsp. *pyraster* (L.) et dans le Caucase, de *P. communis* subsp. *caucasica* (Fed.) Browicz. Ces poiriers donnent de petites poires pierreuses qui ont été cueillies dès la Préhistoire et qui se conservaient séchées. Comme pour la pomme, c'est le greffage qui a permis à des formes améliorées en Asie centrale et dans l'est de la Méditerranée d'être diffusées. Les Romains, en pratiquant de manière systématique le greffage et en développant une soixantaine de variétés, ont eu un rôle prépondérant dans la domestication du poirier en Europe. L'introduction du poirier cultivé correspond probablement en France à la période d'expansion de l'Empire romain. Au Moyen Âge, les variétés cultivées en France, telles que 'Caillou rosat' ou 'Poire d'angoisse', étaient si peu savoureuses qu'elles n'étaient consommées que cuites. Ce n'est qu'à la Renaissance que des variétés donnant des fruits de meilleure qualité apparurent. Sous le règne de Louis XIV, plus de 500 variétés de poirier, dont 'Frangipane' ou 'Cuisse Madame', étaient recensées. La plupart des variétés cultivées actuellement sont issues de sélections réalisées au XIX^e siècle.

Le poirier est une espèce allogame, pérenne, multipliée végétativement par greffage. La plupart des espèces du genre *Pyrus* (par exemple : le nashi – *Pyrus pyrifolia* (Burm.) Nak.) peuvent s'intercroiser.

Il existe plusieurs milliers de variétés cultivées dans près de 80 pays, ce qui est le signe d'une grande diversité des caractéristiques physiologiques de cette espèce.

L'essentiel de la variabilité de cette espèce est conservé dans des collections. En France, il existe une collection rassemblant environ 1 200 génotypes (données BRG, 1998) qui contribue au programme coopératif européen pour les ressources phytogénétiques (*European Cooperative Programme / Genetic Resources, ECP/GR*) coordonné par l'IPGRI, et à la constitution de la collection nationale de poiriers.

Production et utilisation

Le produit récolté, la poire, est un fruit d'un type particulier, dit « pomacé », résultant d'un ovaire infère, et dont la partie comestible charnue correspond à la fois aux tissus du calice et à ceux du péricarpe.

La production mondiale de poire est de 18 millions de tonnes dont plus de la moitié est produite par la Chine. La production a régressé en Europe et aux États-Unis ces dix dernières années à cause du feu bactérien et de la faible durée de conservation de ce fruit. La production française est de 260 000 tonnes (données FAO, 2004).

Dans les vergers traditionnels, la densité est de 1 000 arbres à l'hectare. Des modifications majeures sont apparues à partir des années 1970-1980 dans le verger français, avec une augmentation de la densité (2 000 arbres/ha) pour une entrée en production plus rapide (3 ans au lieu de 5 ans). La durée de vie du verger est généralement de 15 ans au moins.

La poire est un fruit consommé frais ou cuit. Du fait de l'existence de poiriers adaptés à différentes conditions climatiques et des progrès dans les méthodes de conservation, il est possible de consommer des poires en frais de la mi-juillet à la fin mars. Ce fruit est aussi utilisé pour diverses préparations : poire au sirop, sorbet, nectar, poiré et liqueur, alcool à partir de la variété 'Williams'.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés de poirier à fruit de table

Variétés dites d'amateurs

Il existe de très nombreuses variétés dites d'amateurs qui n'entrent pas dans la filière commerciale professionnelle. Il s'agit de variétés anciennes, cultivées dans les jardins familiaux, produisant des poires d'été (par exemple, '**Doyenné de juillet**', '**Beurré Giffard**', '**André Desportes**', '**Beurré Superfin**', etc.), des poires tardives (par exemple, '**Beurré Diel**', '**Bonne de Malines**', '**Beurré**

d'**Hardenpont**', '**Comtesse de Paris**', etc.), des poires très tardives (par exemple, '**Madame Ballet**', '**Doyenné d'hiver**', '**Beurré Bretonneau**', '**Bergamotte Esperen**', etc.) ou des poires à cuire (par exemple, '**Curé**', '**Beurré d'Angleterre**', '**Frangipane**', '**Catillac**', etc.).

Variétés commerciales

Variétés anciennes

C'est l'année d'obtention qui est indiquée ici.

1770, '**Williams**' ou '**Bon Chrétien Williams**' (Wheeler, Aldersmaston, Bershire, Royaume-Uni), variété d'été, issue d'un semis de hasard, donnant des poires d'une qualité exceptionnelle se distinguant par des arômes incomparables. Cette variété est aussi bien adaptée à la consommation en frais qu'à l'industrie (fruits au sirop et distillation). C'est la variété la plus cultivée aux États-Unis (sous le nom de 'Bartlett').

1780, '**Louise Bonne d'Avranches**' (M. de Longueval, Avranches, France), variété de fin d'été, issue d'un semis. Elle produit des fruits de très bonne qualité gustative et ayant une bonne aptitude au transport.

1849, '**Doyenné du Comice**' (Jardin fruitier du Comice horticole d'Angers, France), variété d'automne, issue d'un semis de hasard et qui, depuis, est cultivée dans le monde entier du fait de la qualité exceptionnelle de son fruit.

1845, '**Passe-Crassane**' (M. Boisbunel, Rouen, France), variété d'hiver, issue d'un semis de hasard, dont les fruits sont très recherchés par le consommateur. La très grande sensibilité de cette variété au feu bactérien est la principale cause de son déclin. Elle est désormais interdite de culture en France.

1866, '**Abbé Fetel**', variété, issue d'un semis de hasard, sélectionnée dans le département du Rhône, produisant des fruits allongés, très fermes et croquants. Cette variété n'a commencé à être commercialisée que depuis 1980 en raison de son adaptation au transport.

1870, '**Docteur Jules Guyot**' (E. Baltet, horticulteur à Troyes), variété d'été, issue d'un semis de hasard, très précoce, produisant des fruits de qualité moyenne mais de bonne tenue.

1885, '**Conférence**' (Rivers, pépiniériste à Sow-Bridge, Royaume-Uni), variété d'hiver, issue d'un semis de hasard en Angleterre, produisant des fruits allongés de bonne qualité gustative.

Variétés récentes

C'est l'année d'inscription au catalogue officiel français qui est indiquée ici.

1990, '**Concorde**' (Station d'East Malling, Maidstone, Royaume-Uni), variété issue d'un croisement entre 'Doyenné du Comice' et 'Conférence'. Cette variété n'est pas sensible au dépérissement du poirier, maladie de type phytoplasmique transmise par le psylle commun du poirier *Cacopsylla pyri* et n'a pas une plus grande sensibilité au feu bactérien, ni aux maladies cryptogamiques, que les

grandes variétés commerciales. Le fruit est proche de celui de ‘Conférence’, mais avec un calibre supérieur et une chair très sucrée et croquante. Sa conservation ne semble pas très bonne.

1990, **‘Lombacad’** (Carlton Plants, Oregon, États-Unis), variété issue d’un croisement entre ‘Williams rouge’ et ‘Doyenné du Comice’. Cette variété d’été est peu sensible à la tavelure et à l’oïdium, mais elle est sensible au feu bactérien. Le fruit est gros avec un épiderme rouge, sa chair est moins sucrée et a moins d’arômes que celui de ‘Doyenné du Comice’, mais il se conserve bien.

1991, **‘Harrow Sweet’** (Station de Harrow, Ontario, Canada), variété de fin d’été, issue d’un croisement entre ‘Williams’ et ‘Purdue 80-51’, très peu sensible au feu bactérien et peu sensible à la tavelure et au psylle commun du poirier. Cette variété très fertile a un fruit qui convient pour la transformation et dont la qualité organoleptique en frais est appréciée.

1995, **‘Delwini’** (Delbard Georges, France), variété issue d’un croisement entre ‘Williams Bronzée’ et ‘Beurré Précoce Morettini’. Cette variété de fin d’été a un comportement vis-à-vis des maladies cryptogamiques analogue à celui des grandes variétés commerciales, mais elle est assez sensible au feu bactérien. Son fruit, assez gros, a une chair sucrée et acidulée et présente une bonne tenue pendant la conservation.

1997, **‘Delsavor’** (Delbard Georges, France), variété issue du croisement entre ‘Delbias’ et ‘Conférence’. Le fruit de gros calibre présente un épiderme jaune-vert avec des roussissures sur presque la totalité de la surface. La récolte est concomitante de celle de ‘Doyenné du Comice’ ; la conservation est bonne jusqu’en décembre. La chair est fine, tendre, juteuse et bien sucrée : la qualité gustative est excellente. Cette variété ne présente pas de résistance particulière aux bio-agresseurs.

1998, **‘Angelys’** (INRA, France), variété d’hiver, issue du croisement entre ‘Doyenné d’Hiver’ et ‘Doyenné du Comice’, se distinguant par l’absence de floraison secondaire et donc par une moindre sensibilité au feu bactérien, par une bonne aptitude à l’adaptation au transport et à la conservation de ses fruits. Elle est aussi d’une excellente qualité gustative. Cette variété représente, actuellement, 1 % du verger français et pourrait remplacer, à terme, la ‘Passe-Grassane’ (cf. encadré ci-contre).

Variétés de poirier à fruit d’industrie

‘Antricotin’, variété ancienne de poirier à poiré, originaire de l’Orne.

1920, **‘Fosset’**, variété de poirier à poiré introduite dans la région de Domfront (Orne) et donnant un très bon poiré.

Il n’y a pas eu de création de variétés de poirier à poiré, récemment.

‘Angelys’, une variété en cours de développement

Créée en 1963 par croisement entre les variétés ‘Doyenné d’Hiver’ et ‘Doyenné du Comice’, elle conjugue deux qualités qui ne s’associent que rarement : la bonne tenue à la conservation et une excellente qualité organoleptique. C’est une variété d’hiver qui commence à être appréciée tant des producteurs que des consommateurs. L’arbre de vigueur moyenne, est très facile à conduire, l’affinité est bonne sur cognassier et il s’équilibre rapidement avec une mise à fruits rapide. Le fruit présente un bon calibre commercial, une très bonne richesse en sucre et une bonne tenue en conservation au froid.

‘Angelys’ se place dans une perspective de remplacement de la grande variété ‘Passe-Crassane’, progressivement décimée par le feu bactérien. Bien que non résistante au feu bactérien, elle ne présente pas, au contraire de cette dernière, de floraisons secondaires. Celles-ci se situent, en effet, à une période où les conditions de température et d’hygrométrie sont favorables aux infections par la bactérie. Avec 1 % des surfaces actuellement cultivées en poirier en France, ‘Angelys’ est la nouvelle variété la plus plantée actuellement en France.

En 2003, la production française a été de 160 tonnes. Cette production devrait augmenter progressivement 40 000 tonnes sont prévues en 2007. Une stratégie de valorisation est mise en œuvre pour cette innovation variétale en associant les acteurs de la filière.

Porte-greffe pour le poirier

Les variétés de poirier peuvent être greffées sur un poirier (forte vigueur conférée, bonne compatibilité avec les variétés) ou sur un cognassier (*Cydonia oblonga* Mill.) (faible vigueur conférée, bon calibre du fruit). Les premiers porte-greffe étaient des porte-greffe de semis, c’est-à-dire multipliés par graines. Actuellement, ils sont issus de semis ou de boutures dans le cas du poirier ou de marcottes dans le cas du cognassier.

Porte-greffe anciens

Dès le XVII^e siècle, le type ‘**Cognassier du Portugal**’ est mentionné, au XVIII^e siècle le type ‘**Cognassier de Fontenay**’ est signalé et enfin on trouve le type ‘**Cognassier d’Angers**’ au XIX^e siècle.

En 1930, on distingue le ‘Cognassier de Provence’, le ‘Cognassier d’Angers’ et le ‘Cognassier de Fontenay’.

Porte-greffe récents

1967, ‘**Cognassier d’Angers EM A**’ (Station d’East Mallings, Royaume-Uni), porte-greffe clonal de cognassier conférant une vigueur moyenne. Ce porte-greffe est adapté à la culture au nord de l’Europe. Il a une bonne aptitude à la multiplication, mais il peut présenter des phénomènes d’incompatibilité avec les variétés de poirier exigeantes au greffage.

1967, ‘**Cognassier de Provence BA29**’ (INRA, France), porte-greffe clonal de cognassier, issu d’une sélection clonale de ‘Cognassier de Provence’. Il est bien adapté à la culture de la variété de poirier ‘Williams’ en raison de sa compatibilité supérieure à celle des autres variétés de porte-greffe de cognassier. Il est également plus tolérant à la chlorose ferrique et confère une plus grande vigueur

que les autres porte-greffe de cognassier. Ce porte-greffe a été multiplié à des millions d'exemplaires, sans être protégé par COV.

1976 '**Cognassier d'Angers Sydo**' (INRA / Lepage, France), porte-greffe clonal de cognassier. Il a un comportement comparable à celui du 'Cognassier d'Angers EM A', mais est mieux adapté aux exigences des pépiniéristes.

1981, '**Cognassier EM C**' (Station d'East Malling, Royaume-Uni), porte-greffe clonal de cognassier qui est celui qui confère la plus faible vigueur aux variétés de poirier. Il montre des signes d'incompatibilité avec certaines variétés de poirier exigeantes au greffage.

1989, '**Cognassier d'Adams 332**' (Domaine public, Belgique), porte-greffe clonal de cognassier, issu d'une sélection dans le type des 'Cognassiers d'Angers'. Il confère une vigueur intermédiaire entre celle du 'Cognassier EM A' et celle du 'Cognassier EM C'. Il a été plus particulièrement sélectionné pour son adaptation à la culture de la variété de poirier 'Doyenné du Comice'.

1987-91, série des '**OH × F**' (Brooks Lyle, Oregon, États-Unis), porte-greffe clonaux nord-américains de poirier, issus d'une sélection clonale dans une descendance d'un croisement entre deux variétés de poirier 'Old Home' et 'Farmingdale'. Parmi ces porte-greffe tolérants au feu bactérien et au dépérissement du poirier (maladie associée à un phytoplasme), '**OH × F.333-Brokmal**', inscrit en 1987, a été le plus utilisé en France. Il est maintenant relayé par '**OH × F.87-Farold®-Daytor**', qui induit une meilleure longévité de l'arbre et un meilleur calibre du fruit.

1998, '**Pyriam**' (INRA, France), porte-greffe clonal de poirier. Il est tolérant au feu bactérien, montre une meilleure tolérance à la chlorose ferrique que 'BA29' et induit une vigueur légèrement plus élevée avec une productivité égale. 'Pyriam' pourra remplacer 'BA29' pour la culture de la variété 'Williams' dans le sud-est de la France, en raison de sa très bonne compatibilité avec cette variété de poirier très exigeante au greffage.

Remarque. Les travaux de sélection ont permis d'accroître la diversité génétique grâce à la réalisation de nombreux croisements au niveau des programmes destinés à la création de porte-greffe comme à celle de nouvelles variétés à fruit. Par contre, le nombre de variétés de poirier cultivées est faible, puisqu'il n'y a, dans le monde, qu'une dizaine de variétés cultivées de poids économique suffisant, parmi les 2 000 variétés existantes dans l'espèce *Pyrus communis*.

Regard sur 50 ans de sélection

En France, seuls les établissements Delbard et l'INRA sélectionnent le poirier. La très grande majorité des variétés actuellement cultivées ont été sélectionnées au XIX^e siècle.

C'est vers la recherche de variétés à maturité tardive que le programme français a été orienté à partir des années 1960. Il est, de ce fait, original, les programmes

des États-Unis et du Canada étant orientés vers la sélection de variétés de maturité précoce. La nouvelle variété 'Angelys', qui en est issue, répond à la nécessaire relance de la culture du poirier.

Le programme sur la résistance au feu bactérien a débuté à l'INRA en 1976, dès que cette très grave maladie est apparue en France. Le matériel obtenu doit être maintenant valorisé.

Pour les porte-greffe, les travaux de sélection engagés dans les années 1950-1960 en France et au Royaume-Uni sur l'espèce cognassier ont conduit à la commercialisation de plusieurs porte-greffe de cognassier. Une première classification en 7 groupes a été réalisée par la Station de recherches d'East Malling (Royaume-Uni). Puis, en 1955, l'INRA d'Angers (Maine-et-Loire) a proposé une classification en 13 groupes botaniques dont 2 groupes retenus comme les mieux adaptés à une utilisation comme porte-greffe pour la culture du poirier : celui des 'Cognassiers de Provence' et celui des 'Cognassiers d'Angers' dans lesquels des génotypes intéressants ont été sélectionnés.

Les programmes de recherches de l'INRA d'Angers se sont orientés, dans les années 1970, vers l'étude de descendance de poirier, donc de porte-greffe de la même espèce que les variétés de poirier, en raison de leur potentiel de compatibilité au greffage, de leur variabilité génétique plus importante que celle des cognassiers et des perspectives d'élargissement de la gamme de vigueur conférée. Le critère de tolérance au feu bactérien a été considéré par la suite. Ces programmes ont conduit à la commercialisation de 'Pyriam', porte-greffe tolérant au feu bactérien, qui confère une vigueur moyenne et qui est très bien adapté à la culture des variétés de poirier exigeantes au greffage.

Des programmes d'amélioration sont poursuivis en France, au Royaume-Uni, en Italie et en Espagne. Un programme de résistance à la chlorose ferrique est mis en œuvre conjointement par l'INRA à Angers et l'IRTA à Llerida (Espagne) pour les porte-greffe.

Caractères importants améliorés pour les variétés de poirier

Diversification. L'exploitation des nombreuses mutations naturelles a permis de sélectionner des variétés apportant une certaine diversification.

Qualité organoleptique. Les nouvelles variétés de poirier produisent des fruits d'une meilleure présentation et plus savoureux.

Tolérance aux maladies. La création variétale par hybridation, à partir de grandes variétés européennes et de variétés américaines et canadiennes tolérantes ou peu sensibles au feu bactérien (*Erwinia amylovora*) a permis d'effectuer une sélection précoce en serre d'hybrides peu sensibles au feu bactérien. Plus de 200 000 individus ont été testés dans les années 1990. Ce programme a été étendu à la recherche de tolérance à la tavelure (causée par le champignon *Venturia pyrina*) et au psylle (*Cacopsylla pyri*) insecte qui peut causer un affai-

blissement de l'arbre et transmettre le dépérissement du poirier. Ce dernier problème parasitaire important, qui est dû a un phytoplasme, est pris en compte au Royaume-Uni et en Italie.

Régularité de production. Certaines variétés nouvelles sont moins sensibles aux agents pathogènes, ce qui leur confère une plus grande régularité de production.

Caractères importants améliorés pour les porte-greffe

Homogénéité de vigueur et de production. Le remplacement des porte-greffe de semis, très hétérogènes en vigueur conférée et en port, par des porte-greffe multipliés végétativement a permis d'obtenir une régularité de vigueur et de production en verger. Cela a permis également de sélectionner des génotypes possédant un type de croissance mieux adapté à un travail en pépinière.

Tolérance au feu bactérien. Ce caractère a été introduit dans les porte-greffe de poirier par croisements avec la variété tolérante au feu bactérien 'Old Home'.

Compatibilité au greffage. Ce caractère a été amélioré par sélection de porte-greffe de poirier ne présentant pas de problèmes d'incompatibilité au greffage.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI De nombreuses mutations sont apparues comme diverses nuances de la couleur rouge de l'épiderme ('Williams Rouge', 'Zaired', 'Columbia Red d'Anjou', 'Bronstar').
Mutagenèse induite	NON en France OUI en Chine Il existe 5 variétés de poirier obtenues entre 1983 et 1989 par mutagenèse aux rayons γ. Cette technique a permis de modifier la qualité des fruits et d'obtenir des arbres de moindre vigueur ou plus tardifs, ainsi qu'une résistance à la maladie des taches noires causée par <i>Alternaria alternata</i>. ESSAIS <i>in vitro</i> en Italie Un très large essai de sélection de mutants de 6 variétés, issus d'irradiation γ de microboutures, a permis de repérer plusieurs mutants de port compact, de teneur en sucre ou de durée de conservation accrue, actuellement en cours d'expérimentation.
Croisements interspécifiques	ESSAIS Des croisements ont été réalisés avec le nashi (<i>P. pyrifolia</i>) de manière à introduire des résistances aux insectes et aux maladies. Ce travail n'a débouché sur aucune création variétale, car les plantes obtenues sont trop éloignées du type poirier cultivé européen.

suite...

... suite

Hybridation somatique	ESSAIS Une hybridation somatique entre un poirier sauvage (<i>P. communis</i> L. var. <i>pyraste</i> L.) et la variété porte-greffe de cerisier 'Colt' (<i>Prunus avium</i> L. × <i>P. pseudocerasus</i> Lindl.) a été rapportée au Royaume-Uni. Les hybrides ont été décrits comme ayant le complément chromosomique complet des deux parents et une morphologie foliaire intermédiaire. Aucune utilisation de ces hybrides en création variétale n'a été faite.
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Certaines variétés sont triploïdes, par exemple : 'Beurré d'Amalis', 'Beurré Alexandre Lucas', 'Beurré Diel', 'Curé', 'Catillac', 'Doyenné de Boussach'. Ce niveau de ploïdie n'apporte aucun avantage spécifique chez les variétés.
Variation somaclonale	ESSAIS Des variants somaclonaux des cognassiers porte-greffe 'EM A' et 'BA29' ont été produits après sélection <i>in vitro</i> pour la tolérance à une carence en fer. Les sélections les plus avancées ont été évaluées en serre et au champ, mais aucune utilisation de ces variants en création variétale n'a encore été faite.
Transgénèse	ESSAIS Une méthode efficace pour transformer génétiquement le poirier a été mise au point dès 1996 à l'INRA d'Angers. Des poiriers présentant un certain niveau de résistance au feu bactérien ont été obtenus en transférant le gène codant l'attacine E, isolé de <i>Hyalophora cecropia</i> , le gène de dépolymérase isolé du bactériophage ϕ Ea1h, le gène de lactoferrine bovine et le gène de harpine N isolé d' <i>Erwinia amylovora</i> . L'expression de plusieurs promoteurs de tabac (<i>Nicotiana tabacum</i> L.), inductibles par les agents pathogènes, a également été caractérisée chez le poirier. Aux États-Unis, un autre gène codant pour un peptide lytique (D5C1), intégré dans la variété 'Bartlett', a montré un effet contre le feu bactérien et contre le psylle commun. Enfin, en Suède, l'intégration du gène <i>rolB</i> chez le porte-greffe « nanisant » 'BP 10030' a permis d'améliorer significativement sa capacité d'enracinement. Deux essais au champ sont actuellement en cours aux États-Unis et un en Europe (Suède). Il n'y a pas de variétés transgéniques commercialisées actuellement.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Les variétés sont généralement greffées sur des porte-greffe de cognassier ou de poirier.
Sélection sanitaire	OUI Par thermothérapie.
Haploïdisation	ESSAIS La production de plantes haploïdes et de plantes haploïdes doublées est possible à partir d'un certain nombre de variétés telles que 'Doyenné du Comice' ou 'Williams'. Cette méthode n'a pas encore été utilisée pour la création variétale.
Recours à la stérilité mâle	OUI Certaines variétés n'ont pas de pollen ('Magness', 'Marguerite Marillat').

suite...

... suite

Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Les variétés de poirier présentent une auto-incompatibilité de type gamétophytique. Les vergers ne sont donc pas monovariétaux.
Marquage moléculaire	ESSAIS En relation avec les autres Rosacées fruitières, en particulier le pommier (<i>Malus domestica</i> (Borkh.) Borkh.). Les premières cartes génétiques du poirier européen et du poirier asiatique viennent d'être publiées. Deux gènes majeurs de résistance aux maladies sont positionnés.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale dans un semis de hasard. Croisement diallèle. La variété 'Angelys' est issue de la combinaison hybride entre 'Doyenné d'Hiver' et 'Doyenné du Comice', à partir d'un croisement diallèle. Schéma de croisements factoriels (en cours à l'INRA d'Angers) impliquant 3 variétés nord-américaines peu sensibles au feu bactérien et une trentaine de variétés européennes.
Types variétaux	Variété clonale : – issue de semis de hasard ('Williams') ; – issue d'hybridation contrôlée ('Angelys').

Perspectives d'amélioration

Au cours des dernières décennies, la culture du poirier a régressé en France en raison de difficultés diverses, notamment au niveau cultural et économique. L'innovation variétale peut constituer un élément de « redynamisation » de la filière, comme le montre le lancement de la variété 'Angelys'.

L'amélioration du poirier se poursuivra, en particulier à l'INRA, en ce qui concerne la caractérisation des ressources génétiques et la création variétale. Actuellement, 800 variétés sont maintenues en collection ainsi qu'une centaine d'hybrides issus de travaux antérieurs ; ce matériel constitue un réservoir de gènes d'un grand intérêt. Suite à l'avancée inexorable du feu bactérien, l'INRA a conduit ces deux dernières décennies un programme de création variétale pour l'obtention de fruits pour une maturité de septembre à octobre, à partir de géniteurs des États-Unis et du Canada, peu sensibles au feu bactérien. L'évaluation en verger des hybrides résultant des travaux entrepris au début de la décennie 1990 est en cours. Cette activité de sélection créatrice a été relancée en 2004-2005 en intégrant les connaissances acquises en matière de faible sensibilité à la tavelure et au psylle commun du poirier (*Cacopsylla pyri*). Le programme repose donc sur la qualité des fruits (fermeté-jutosité-arômes), la résistance aux bio-agresseurs (tavelure, feu bactérien, psylle commun) et l'architecture de l'arbre adaptée à une conduite économe en main-d'œuvre.

Par ailleurs, l'INRA d'Angers a engagé un nouveau programme de création de porte-greffe pour le poirier à partir du genre *Pyrus* qui vise à conférer une faible vigueur à la variété, une excellente compatibilité au greffage et à augmenter la tolé-

rance à la chlorose ferrique. La gamme de vigueur conférée aux variétés actuelles de poirier par les porte-greffe étant encore trop restreinte, il est nécessaire de l'élargir.

Les principaux partenaires de l'INRA sont, actuellement en Europe, l'équipe italienne de Bologne et aux États-Unis, la station de recherches de Kearneysville (Virginie).

Les travaux de création variétale se poursuivent dans un contexte économique morose du fait de la faible rémunération que reçoit l'arboriculteur.

Caractères à améliorer pour les variétés de poirier

Résistance aux bio-agresseurs. Des progrès importants peuvent être encore obtenus par croisement intraspécifique pour améliorer la résistance aux bio-agresseurs, en particulier, la tolérance au feu bactérien, à la tavelure et au psylle commun du poirier. La lutte intégrée vis-à-vis du psylle commun donne d'excellents résultats non seulement pour le poirier mais également pour les genres *Pyrus* L. et *Cydonia* P. Mill. L'hybride $\times$ *Pyronia veitchii* (Trabut) Guill., issu du croisement entre *Pyrus communis* et *Cydonia oblonga*, et obtenu en Angleterre par Veitch peu avant 1916, est utilisé comme indicateur biologique des maladies à virus du poirier et du cognassier.

Régularité de production. Ce caractère peut encore être amélioré. Outre la résistance aux bio-agresseurs, il est lié à la maturation du fruit et à l'alternance de floraison et de fructification. Des études sur l'architecture de l'arbre, visant notamment à quantifier le phénomène d'alternance, sont en cours.

Caractères à améliorer pour le porte-greffe

Réduction de la vigueur. Il est nécessaire d'obtenir des porte-greffe de poirier conférant une vigueur comparable à celle des porte-greffe de cognassier pour pouvoir élargir la gamme vers des porte-greffe « nanisants » compatibles avec les variétés exigeantes. Un programme commencé à l'INRA en 1997, porte sur la création de tels porte-greffe compatibles et tolérants au feu bactérien.

Tolérance à la chlorose ferrique. La culture du poirier se développe dans les pays méditerranéens, où il existe un fort besoin en porte-greffe adaptés aux sols calcaires. Il faut donc augmenter le niveau de tolérance des porte-greffe à la chlorose ferrique. Des croisements interspécifiques entre des porte-greffe de poirier et d'espèces sauvages sont en cours à l'INRA depuis 1998, afin d'introduire dans ces génotypes des caractères de résistance aux stress abiotiques. Ils font l'objet d'une collaboration avec l'IRTA en Espagne.

Techniques à développer

Le développement de marqueurs moléculaires pour réaliser une sélection assistée par marqueurs et une carte génétique, en relation avec les travaux menés

sur d'autres Rosacées fruitières ainsi que la valorisation des lignées haploïdes doublées, font partie des objectifs prioritaires.

La transgénèse pourrait être utilisée pour introduire une tolérance au feu bactérien dans les principales variétés.

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture du catalogue officiel des espèces et variétés fruitières.

1967, modification, par arrêté ministériel : classes I et II de la rubrique particulière variétés d'arbres fruitiers.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste plantes fruitières destinées à l'exportation.

En 2003, 85 variétés de poirier européen (ce terme est employé par opposition au terme de poirier asiatique qui appartient à l'espèce *P. pyrifolia*) sont présentes dans le catalogue officiel français ainsi que 16 porte-greffe (dont 12 clones : 5 porte-greffe de cognassier et 7 porte-greffe de poirier). Il n'existe pas de catalogue européen pour les espèces fruitières. Dans les essais réalisés par l'INRA pour le compte du GEVES, une cinquantaine de descripteurs morphologiques ou phénologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de deux cycles de production significative de fruits. À l'issue de cet examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, ainsi que les arbres maintenus en collection, permettent de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des plants. C'est le Ctifl qui en a la responsabilité par délégation du ministère chargé de l'Agriculture. L'inscription au catalogue officiel français est obligatoire pour qu'une variété puisse entrer dans le système de certification. Ainsi, pendant l'hiver 2004-2005, près de 230 000 plants certifiés ont été vendus pour 19 variétés certifiées de poirier européen.

Pour en savoir plus

Bois D., 1927. Poirier. Dans : *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture*. II. Phanérogames fruitières. Ed. Paul Lechevalier, Paris, 281-307.

Bouvier L., Zhang Y.X. et Lepinasse Y., 1993. Two methods of haploidization in pear, *Pyrus communis* L. : greenhouse seedling selection and *in situ* parthogenesis induced by irradiated pollen. *Theor. Appl. Genet.*, 87 (1/2), 229-232.

- Bunnag S., Dolcet-Sanjuan R., Mok D.W.S. et Mok M.**, 1996. Response of two somaclonal variants of quince (*Cydonia oblonga*) to iron deficiency in the greenhouse and field. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 121, 1054-1058.
- Chevreau E. et Bell R.**, 2004. Pear (*Pyrus* spp.) and quince (*Cydonia* spp.). Dans : *Biotechnology of Fruit and Nut Crops*, R.E. Litz, éd., C.A.B. International, Wallingford, 543-565.
- Delbard G.**, 1993. *Les beaux fruits de France d'hier et d'aujourd'hui*. Éditions G. Delbard, Paris, 270 p.
- Dosba F. et Lespinnasse Y.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.
- Gautier M.**, 2001. Poirier. Dans : *La culture fruitière*. Volume 2, *Les productions fruitières*. Tec & Doc, Paris, 149-246.
- Huchette J.**, 2002. Angelys, reine des poires. *Réussir, Fruits & Légumes*, 213, 78-79.
- Iketani H., Abe K., Yamamoto T., Kotobuki K., Sato Y., Saito T., Terai O., Matsuta N. et Hayashi T.**, 2001. Mapping of disease-related genes in Japanese pear using a molecular linkage map with RAPD markers. *Breed. Sci.*, 51, 179-184.
- Le Lezec M., Bautreais P. et Belouin A.**, 1991. L'amélioration du poirier pour la résistance au feu bactérien. *Arboric. Fruit.*, 440, 29-37.
- Malnoy M., Brisset M.-N. et Chevreau E.**, 2002. Expression of a depolymerase gene in transgenic pears increased only slightly their fire blight resistance. *Acta Hortic.*, 590, 401-405.
- Malnoy M., Venisse J.-S., Brisset M.-N. et Chevreau E.**, 2003. Expression of bovine lactoferrin cDNA confers resistance to *Erwinia amylovora* in transgenic pear through iron chelation. *Mol. Breed.*, 12 (3), 231-244.
- Malnoy M., Venisse J.-S., Reynoird J.-P. et Chevreau E.**, 2003. Activation of three pathogen-inducible promoters of tobacco in transgenic pear (*Pyrus communis* L.) after abiotic and biotic elicitation. *Planta*, 216 (5), 802-814.
- Masseron A.**, 1989. *Les porte-greffe pommier, poirier et nashi*. Édition Ctifl, Paris, 287 p.
- Masseron A. et Trillot M.**, 1991. *Le poirier*. Édition Ctifl, Paris, 217 p.
- Mourgues F., Chevreau E., Lambert C. et Bondt A.**, 1996. Efficient *Agrobacterium* mediated transformation and recovery of transgenic plants from pears (*Pyrus communis* L.). *Plant Cell Rep.*, 16 (3/4), 245-249.
- Ochatt S.J., Patat-Ochatt E.M., Rech E.L., Davey M.R. et Power J.B.**, 1989. Somatic hybridization of sexually incompatible top-fruit tree rootstocks, wild pear (*Pyrus communis* var. *pyraster* L.) and Colt cherry (*Prunus avium* × *pseudocerasus*). *Theor. Appl. Genet.*, 78, 35-41.
- Predieri S. et Zimmerman R.H.**, 2001. Pear mutagenesis. *In vitro* treatments with gamma-rays and field selection for productivity and fruit traits. *Euphytica*, 117, 217-227.
- Puterka G.J., Bocchetti C., Dang P., Bell R.L. et Scorza R.**, 2002. Pear transformed with a lytic peptide gene for disease control affects nontarget organisms, pear psylla (*Homoptera : Psyllidae*). *J. Econ. Entomol.*, 95, 797-802.
- Reynoird J.-P., Mourgues F., Norelli J., Aldwinckle H.S., Brisset M.-N. et Chevreau E.**, 1999. First evidence for improved resistance to fire blight in transgenic pear expressing the attacin E gene from *Hyalophora cecropia*. *Plant Sci.*, 149 (1), 23-31.
- Simard M.-H. et Masseron A.**, 2002. Bilan de l'expérimentation porte-greffe poirier en France. 1^{re} partie : les sélections OHF (USA). *Arboric. Fruit.*, 563, 19-24.
- Simard M.-H. et Masseron A.**, 2002. Bilan de l'expérimentation porte-greffe poirier en France. 2^e partie : les sélections INRA (France). *Arboric. Fruit.*, 564, 35-41.
- Simard M.-H. et Masseron A.**, 2002. Bilan de l'expérimentation porte-greffe poirier en France. 3^e partie : les sélections des autres pays. *Arboric. Fruit.*, 565, 19-23.
- Simard M.-H. et Michelesi J.-C.**, 2002. « Pyriam » : a new pear rootstock. 8th ISHS Pear Symposium Ferrara-Bologna, 4-9 Sept. 2000. *Acta Hortic.*, 596 (1), 351-355.

Yamamoto T., Kimura T., Shoda M., Imai T., Saito T., Sawamura Y., Kotobuki K., Hayashi T. et Matsuta N., 2002. Genetic linkage maps constructed by using an interspecific cross between Japanese and European pears. *Theor. Appl. Genet.*, 106, 9-18.

Yoshioka T., Masuda T., Kotobuki K., Sanada T. et Ito Y., 1998. Gamma-ray-induced mutation breeding in fruit trees : breeding of mutant cultivars resistant to black spot disease in Japanese pear. *Jap. Agric. Res. Quart. – Tsukuba Ibaraki*, 33, 227-234.

Zhu L.H., Ahlman A. et Welander W., 2003. The rooting ability of the dwarfing rootstock BP10030 (*Pyrus communis*) was significantly increased by introduction of the *rolB* gene. *Plant Sci.*, 135, 829-835.

Le pois

Pisum sativum L. ($2n = 2x = 14$)
(Fabacées ou Papilionacées)

Présentation de l'espèce

Le pois, *Pisum sativum* L., a probablement été domestiqué au Proche-Orient, où l'on trouve la sous-espèce *syriacum* Berger, plante de steppes qui serait l'ancêtre direct des pois cultivés, et la sous-espèce *elatius* (Steven) Schmalh. Les premières traces de culture du pois datent du début du Néolithique (environ 7 000 ans av. J.-C.), et ont été trouvées en Irak et en Turquie. Le pois va faire partie du premier cortège de plantes qui ont fondé l'agriculture en Europe, en Asie centrale et en Égypte, puis en Éthiopie. Il a été très cultivé dans plusieurs régions montagneuses, qui constituent des centres secondaires de diversité. On distingue ainsi l'Éthiopie et le Yémen avec la sous-espèce *abyssinicum* (A. Braun) Berger, le Caucase avec la sous-espèce *transcaucasicum* Govorov et l'Asie centrale avec la sous-espèce *asiaticum* Govorov.

En Europe, il arrive en Grèce vers 5500 av. J.-C., dans la basse vallée du Rhin vers 4400-4200, et dans le sud de la France vers 3000. Avant l'ère chrétienne, les Grecs et en particulier Théophraste, avaient déjà décrit le pois. Plus tard, des écrits des auteurs, tels que Columelle et Pline l'Ancien, laissent aussi supposer que ce légume sec était également cultivé par les Romains. Au Moyen Âge, les pois, toujours consommés en grains secs, étaient, avec les lentilles (*Lens culinaris* Med.) et les fèves (*Vicia faba* L.), presque autant cultivés que le blé (*Triticum aestivum* (L.) Thell.). Ces légumineuses ont eu un rôle déterminant dans la lutte contre les famines. En effet, par leur richesse en protéines et leur composition en acides aminés, ces graines sont complémentaires des régimes à base de céréales. C'est en 1660 que le petit pois vert a été apporté d'Italie par Audiger en France où il est rapidement devenu le légume favori de Louis XIV. Ce légume était également apprécié par la noblesse anglaise. À la fin du XIX^e siècle, le pois a été la plante qui a permis à Gregor Mendel de fonder la génétique (cf. encadré p. 586). Au début du XX^e siècle, le pois était uniquement destiné à la consommation humaine comme légume frais (pois potager et pois mangetout) ou sec (pois de

Le pois et la génétique

Les bases de la génétique ont été découvertes chez le pois par un religieux autrichien Gregor Mendel et énoncées en 1865. G. Mendel a défini les notions d'homozygotie et d'hétérozygotie, de dominance et de récessivité et il a établi la loi de la pureté des gamètes à partir de croisements entre pois à grain lisse et pois à grain ridé. Des croisements réalisés entre des pois à grain lisse jaune et d'autres à grain ridé vert lui ont aussi permis d'élaborer la loi de ségrégation des caractères. Des travaux des années 1990 ont montré que l'un des caractères étudiés par Mendel, le caractère « pois ridé », résultait de l'insertion d'un rétrotransposon dans un gène impliqué dans la biosynthèse de l'amidon.

casserie). Entre les années 1950 et les années 1970, la production globale de pois potager a quintuplé grâce au développement des industries de conserverie et de surgélation. La France est ainsi devenue le premier producteur européen de pois de conserve. Ce succès, lié à la possibilité de consommer le pois toute l'année, s'est appuyé sur l'amélioration génétique qui est à l'origine de l'apparition de nouvelles variétés spécialement adaptées.

En 1973, l'embargo sur le soja (*Glycine max* (L.) Merrill) des États-Unis à l'encontre de la Communauté européenne a fait prendre conscience à cette dernière combien elle était dépendante vis-à-vis de l'extérieur pour ses protéines végétales utilisées en alimentation animale et combien il était nécessaire de développer en Europe la culture de plantes riches en protéines destinées à l'alimentation du bétail. Cet événement est à l'origine de la naissance du pois protéagineux qui s'est développé à partir de 1980 sous l'effet d'un effort de recherche au niveau européen et de l'essor d'une filière. La France est devenue, au milieu des années 1990, le premier producteur européen de pois protéagineux (environ 70 % de la production européenne) avec une surface d'emblavement ayant connu un pic de plus de 700 000 ha en 1993, cela grâce au soutien de la PAC. En 2004, cette surface a bien baissé puisqu'elle n'est maintenant que de 366 000 ha et cela du fait d'un prix moins attractif et d'un problème de développement d'une maladie fongique racinaire due à *Aphanomyces euteiches*. Malgré le développement important de la culture du pois en France et en Europe, l'Europe reste, encore aujourd'hui, dépendante à plus de 70 % des importations de matières riches en protéines pour ses élevages animaux.

Le pois est une espèce annuelle et autogame, multipliée par semences. Les fleurs sont cléistogames (le plus fréquemment, l'autopollinisation a lieu avant ouverture de la fleur) et seuls quelques Hyménoptères peuvent visiter les fleurs et transporter le pollen. Ces visites peuvent conduire à quelques hybridations accidentelles entre variétés de pois. Aucun croisement interspécifique n'est possible, excepté avec l'espèce proche *Pisum fulvum* Sibthorp & Sm.

Le pois est une Légumineuse. Il a, comme la plupart de ces espèces, la faculté de fixer l'azote atmosphérique de l'air, sur la base d'une symbiose avec des bactéries abritées dans les nodosités de ses racines. Grâce à ces bactéries (*Rhizo-*

bium leguminosarum bv. *viciae*) présentes dans la plupart des sols européens, la culture du pois ne nécessite pas de fertilisation azotée.

Il existe, chez le pois, une grande diversité génétique au travers des types sauvages et des nombreuses variétés anciennes. La situation de la biodiversité du pois est néanmoins préoccupante. Depuis 20 ans, les centres d'origine deviennent arides et de plus, sont le siège de nombreux conflits, ce qui rend toute prospection difficile. Certains établissements de sélection réduisent l'effort de sélection sur le pois, le nombre de banques de gènes est faible dans le monde et certains centres de conservation, notamment ceux situés dans les Pays de l'Est, sont de plus en plus fragiles. Par contre, les banques de Pullman (États-Unis), du John Innes Center (JIC, Royaume-Uni), de Plovdiv (Bulgarie), de Saint-Petersbourg (VIR, Russie), de Pékin (CAAS, Chine) et de Dijon (INRA, France) sont très importantes. En outre, le JIC et l'INRA développent des ressources pour les études moléculaires (populations de lignées recombinantes, banques de mutants de TILLING) et amplifient leur travail de caractérisation phénotypique et moléculaire.

Production et utilisation

Le produit est récolté sous forme :

- de plante entière, dans le cas du pois fourrager ;
- de gousse au stade immature dans le cas du pois mangetout ;
- de graine exalbuminée,
 - au stade avant maturité. La graine contient alors environ 85 % d'eau. Après ouverture des gousses, on obtient les petits pois verts de maraîchage, de conserve, de surgélation ;
 - au stade sec (15 % d'eau). Le pois sec est alors, soit le pois cassé qui est classé comme un légume sec, soit le pois protéagineux qui est destiné à l'alimentation animale. Dans certains pays, on consomme aussi le pois sec entier ;
- de pousses feuillées, qui font l'objet de productions spécialisées en Chine.

La production mondiale de pois vert (frais, appertisation, surgélation) est de 9,1 millions de tonnes (matière fraîche). Les principaux pays producteurs sont l'Inde (3,2 millions de tonnes), la Chine (2,1 millions de tonnes), les États-Unis (0,9 million de tonnes) (données FAO, 2004). La production française de pois vert a été de 207 000 tonnes (données UNILET, cette même année). La production mondiale de pois sec est de 11,9 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont le Canada (3,3 millions de tonnes), la France (1,7 million de tonnes), la Russie (1,2 million de tonnes), et la Chine (1,1 million de tonnes) (données FAO, 2004).

Riche en énergie et en protéines, le pois est utilisé pour l'alimentation humaine et l'alimentation animale. Les types de pois cultivés à l'heure actuelle sont répartis selon ces deux grandes utilisations.

Alimentation humaine

On distingue chez les pois potagers ceux dont les semences sont lisses et ceux dont les semences sont ridées. Différents gènes déterminent ce caractère ridé, *r* et *rb* étant les plus fréquents. Le caractère de ridure ne s'exprime pas au stade vert, mais seulement à maturité. Ces gènes conduisent à un goût sucré apprécié par les consommateurs (chez ces variétés, le stockage des réserves carbonées est orienté vers les sucres solubles au détriment des amidons). On classe les pois potagers en :

- types récoltés frais :
 - le pois de conserve, qui est adapté à l'appertisation ou à la surgélation. En général, on utilise plutôt des pois à grain lisse vert clair pour l'appertisation (mais des pois à grain ridé vert clair petits peuvent aussi être utilisés) et des pois à grain ridé vert foncé pour la surgélation ;
 - le petit pois ou pois maraîcher ou à écosser, qui est destiné à la production en frais ;
 - le pois mangetout, qui ne diffère du pois maraîcher que par l'absence de parchemin dans la gousse, ce qui permet de consommer cette dernière. Il existe deux types de mangetout, celui dont l'épaisseur de la gousse est identique à celle de presque toutes les autres variétés, et celui à gousse charnue (le péricarpe est alors beaucoup plus épais) ;
- types récoltés secs : le pois de casserie, pois à grain lisse et bien sphérique, donne après un battage énergique, un légume sec : le pois cassé. Il faut signaler qu'au Royaume-Uni, on récolte en sec de gros pois à grain lisse farineux qui sont ensuite trempés, colorés et appertisés ou surgelés. La législation française interdit un tel procédé.

Alimentation animale

Ils sont de deux types :

- le pois fourrager (*P. sativum* subsp. *arvense* (L.) Poir.) se distingue par un appareil végétatif très développé (les tiges peuvent atteindre 2 mètres et sont très ramifiées). Il peut être cultivé seul ou en association avec une céréale, comme le triticales (*× Triticosecale* Wittm.) ou le blé, qui sert alors de tuteur. Produisant une quantité importante de matière verte à l'hectare, il est principalement utilisé comme fourrage vert après ensilage ;
- le pois protéagineux est issu du pois de casserie qui a été modifié de manière à réduire la croissance des tiges et la verse, et à augmenter le rendement et la teneur en protéines de la graine (entre 21 et 26 %). Il est récolté sec. L'utilisation dominante de cette graine est l'alimentation du porc.

Histoire des variétés cultivées en France

En fonction des zones de culture et des types de production, on distingue les pois de printemps et les pois d'hiver. Dans le catalogue variétal, il y a une prépondérance de variétés de printemps. La plupart des pois d'hiver actuels sont

des pois de printemps qui résistent au froid et à l'hiver. Actuellement, seuls quelques pois fourragers sont porteurs d'un gène *Hr* de réponse à la photopériode, qui permet un blocage de la plante à l'état végétatif durant l'hiver.

Pois potager ou petit pois

Variétés anciennes

Elles sont toutes de printemps.

1660, '**Michaux**', une des premières variétés de pois potager, venant de Hollande, introduite en France sous le règne de Louis XIV. Cette variété est très haute, tardive, à gousse assez longue et à grain lisse assez gros.

1810, '**Ridé vert de Knight**' (Knight, Royaume-Uni), variété de pois à grain ridé dont la sélection a été commencée en Angleterre par Thomas Knight dès 1787 et qui a été introduite en France par M. de Vilmorin en 1810.

Années 1860-1880, '**Little Gem**' (Dr Mac Lean, Colchester, Royaume-Uni), variété de pois à grain ridé. Elle est à l'origine de nombreuses variétés comme 'Merveille d'Amérique' et 'Merveille d'Angleterre'.

1872, '**Plein le panier**' ou '**Fillbasket**' (T. Laxton, Royaume-Uni), variété demi-naine (c'est-à-dire d'une hauteur comprise entre 0,80 et 1,20 m) à grain rond lisse se distinguant par sa précocité, son rendement (pour l'époque) et sa résistance au froid, mais aussi malheureusement par un grain peu sucré et un peu farineux, comme tout grain lisse.

1880, '**Téléphone à rames**' (Curverwell, jardinier à Thorpe Perrow, Royaume-Uni), variété de pois à rames (c'est-à-dire d'une hauteur supérieure à 1,20 m) et à grain ridé. Cette variété, à haut rendement, a été très cultivée aux environs de Paris.

1894, '**Sénateur**' ou '**Senator**' (Webb, Royaume-Uni), variété « demi-rames » à gros grain ridé, de bonne qualité gustative qui fut très cultivée. Elle provient du croisement 'Giant Marrow' × 'Prince of Wales'.

1908, '**Lincoln**' (Lincoln, Royaume-Uni), variété naine à grain ridé se caractérisant par sa résistance à 6 races de grasse. C'est une sélection venant de 'Sénateur'.

1925, '**Merveille de Kelvedon**' (Hurst, Royaume-Uni), variété à grain ridé se distinguant par son excellente qualité gustative. Issue du croisement entre 'Lincoln' et 'Petite Merveille', elle a été sélectionnée pour sa précocité et son nanisme. Elle a été très cultivée.

De nombreuses variétés locales ont été entretenues par les cultivateurs de la Région parisienne à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. Parmi elles, on peut citer : '**Clamart 3 gousses**', '**42 de Sarcelles**' et '**Pois de Marly**'.

Variétés récentes

Le petit calibre du grain est le premier critère recherché avant la productivité. Ce sont toutes des variétés de printemps. Parmi les nombreuses variétés, on peut citer : 1940, **‘Douce Provence’** (Tézier Frères, France) et **‘Gloire de Quimper’** (Tézier Frères, France), variétés naines (c’est-à-dire d’une hauteur inférieure à 0,80 m), précoces et à grain lisse. ‘Douce Provence’ est issue du croisement entre ‘Petit Provençal’ (Sharpe, Royaume-Uni) et ‘Merveille de Kelvedon’.

1955, **‘Télévision’** (Vilmorin-Andrieux, France), variété demi-naine à grain ridé vert.

1960, **‘Arkel’** (Clause, France) et 1964, **‘Tézieridé’** (Tézier Frères, France), variétés naines très précoces à grain ridé.

L’évolution vers le type nain qui évite de mettre des tuteurs (rames) et la précocité de récolte sont des atouts pour la culture du pois primeur récolté à la main.

1960, **‘Obéron’** (Clause, France), variété à grain lisse vert clair qui a marqué son temps par sa très grande précocité.

1984, **‘Kelvil’** (Vilmorin, France), variété à grain ridé vert de type ‘Merveille de Kelvedon’ qui a marqué son époque par sa très grande précocité.

1995, **‘Matisse’** et **‘Utrillo’** (Asgrow USA, États-Unis), variété à gros grain ridé vert (340 à 360 g les 1000 grains), très sucré à l’état frais et à gousse très longue (12 cm).

2000 **‘Dorian’** (Asgrow USA, États-Unis), variété à grain ridé vert comme les deux précédentes variétés, mais à gousse plus longue (14 cm), plus tardif et résistant à l’oïdium.

Pois de conserve (pour l'appertisation et la surgélation)

Ce sont toutes des variétés de printemps.

1959, **‘Starnain’** (Blondeau, France), une des toutes premières variétés à grain lisse vert clair, résistante au mildiou.

1968, **‘Aldot’** (Roger Brothers, États-Unis), variété demi-naine précoce, à petit grain lisse et vert clair. Cette variété ayant peu de feuillage, assez productive, a représenté une révolution parmi les variétés précoces productives pour l’étalement de la récolte.

1970, **‘Minarette’** (Sluis en Groot, Pays-Bas), variété naine semi-tardive à petit grain ridé et vert clair. Cette nuance « clair » au lieu de « foncé » a permis d’utiliser des pois à grain ridé en appertisation (en effet, le grain ridé, qui est en général vert foncé, brunit pendant cette opération).

1971, **‘Cador’** (Clause, France), variété naine très précoce et à petit grain lisse et vert clair.

1972, **‘Erygel’** (INRA, France), une des premières variétés françaises résistante à l’oïdium. Cette variété à grain jaune ridé est destinée à la surgélation.

1975, '**Mini**' (Asgrow USA, États-Unis), variété naine moyennement tardive à petit grain ridé et vert clair. Cette variété très tardive, qui convient pour l'appertisation, a été très cultivée dans les années 1980.

1993, '**Piano**' (Asgrow USA, États-Unis), variété naine à grain lisse. C'est la première variété pour les surfaces cultivées en France en 2002, en raison de son rendement et de la finesse de son grain.

1997, '**Etna**' (Vilmorin, France), variété précoce à grain lisse vert très petit, à grain vert moyen à l'état frais, donnant un pourcentage élevé de calibre extra-fin et destinée à l'appertisation.

1998, '**Tristar**' (Asgrow USA, États-Unis), variété moyennement tardive à grain ridé jaune gros. Au stade frais, le grain est vert foncé et destiné à la surgélation.

Pois mangetout ou sans parchemin

Ce sont toutes des variétés de printemps.

1818, '**Corne de bélier**', variété à rames et à grain lisse, possédant une gousse large enroulée.

1903, '**Carouby de Maussane**', variété de type « demi-rames » et à grain lisse, possédant une gousse large droite.

1968, '**Friand**' (Tézier Frères, France), variété naine à gousse large et à gros grain lisse, intéressante par la petite taille de la plante.

1982, '**Bamby**' (Gautier, France), variété naine à gousse très longue et large et à grain lisse.

1995, '**Copernic**' (Clause SP, France), variété de pois mangetout de précocité moyenne, à gros grain ridé vert et à gousse charnue de longueur moyenne (8 cm). La paroi de la gousse peut atteindre 8 mm d'épaisseur. La première variété de pois de ce type a été obtenue en 1897 par C. Denaiffe à la suite d'hybridations entre les variétés 'Sans parchemin Géant à très large cosse' et 'Sans parchemin pur beurre'. Ce type a ensuite disparu avant de réapparaître sous l'impulsion de quelques sélectionneurs nord-américains (par exemple, la variété 'Sugar Snap', Rogers Seed Company, États-Unis, 1979) et plus récemment en France.

Pois de casserie

Ce sont toutes des variétés de printemps très productives. Le grain a un gros calibre et une enveloppe fine pour faciliter le décorticage.

1839, '**Victoria Marrow**', variété à rames, à gros grain lisse jaune de forme anguleuse. Des variétés ayant également cette forme caractéristique de grain sont encore cultivées au Royaume-Uni.

1934, '**Rondo**', variété naine à grain vert lisse, résistante à 6 races d'*Ascochyta pisi*, un champignon agent de l'anthracnose.

1976, **‘Finale’** (Cebeco Handelsraad, Pays-Bas), variété naine à gros grain lisse vert, caractérisée par une bonne productivité. Cette variété a été remarquée pour son intérêt agronomique. Elle est à l’origine de la majorité des variétés de pois protéagineux actuelles.

1977, **‘Amino’** (Blondeau, France), variété naine à gros grain lisse jaune. Cette variété très productive en particulier dans les sols crayeux, a été sélectionnée comme variété de type protéagineux. Elle a été la première de ce type à grain jaune.

Au-delà de 1977, il n’y a plus de création variétale spécifique pour la casserie. Parmi les variétés de pois protéagineux, on utilise pour la casserie celles dont l’enveloppe du grain est fine (le décorticage est alors plus facile).

Pois fourrager

Toutes les variétés sont à fleur anthocyanée. En raison de la hauteur importante de la plante (0,80-1,20 m) et de la flexuosité de la tige, la culture du pois fourrager a été longtemps associée à celle d’une céréale, le seigle (*Secale cereale* L.) en particulier, qui servait de support.

‘Champagne’, variété population de pois d’hiver originaire de Champagne. Cette population a servi de géniteur de résistance au froid pour des variétés de conserve. Son croisement avec un pois de conserve de printemps a également permis de transférer sa résistance au froid à un nouveau type de pois et de créer le pois protéagineux d’hiver.

1957, **‘Gali’** (Blondeau, France), variété de printemps utilisée pour le grain.

1957, **‘Moyencourt’**, variété semi-précoce de pois de printemps qui a été beaucoup cultivée.

1964, **‘Assas’** (INRA, France), variété de pois d’hiver connaissant un certain succès. Elle se distingue par une bonne résistance au froid.

1991, **‘Picar’** (Carneau Frères, France) variété de pois d’hiver tardive, à grain lisse jaune petit, à tégument brun rougeâtre et à gousse courte (6 cm).

Pois protéagineux

Ce sont des variétés très productives. Le grain a un gros calibre et une haute teneur en protéines. Toutes les variétés sont à fleur blanche.

Variétés de printemps

1976, **‘Finale’** (Cebeco Handelsraad, Pays-Bas), première variété cultivée pour produire du pois protéagineux. C’est une variété à haut rendement, feuillue et à grain vert.

1986, **‘Solara’** (Cebeco, Pays-Bas), première variété de type *afila* (cf. encadré p. 595). Cette variété, version *afila* de ‘Finale’ est à l’origine du développement de la culture du pois protéagineux. Le type *afila* est résistant à la verse et assure

indirectement un meilleur état sanitaire du couvert végétal, notamment vis-à-vis des parasites fongiques.

1991, '**Baccara**' (Florimond Desprez, France), variété de type *afila* à grain jaune. Elle a constitué une amélioration sensible en productivité à l'époque de son inscription.

1997, '**Athos**' (Nickerson SA, France), variété de type *afila* de précocité moyenne à grain lisse jaune très gros.

2000, '**Magellan**' (Momont et Fils, France), variété de type *afila*, très tardive, à grain lisse jaune gros, qui marque une étape dans l'évolution de l'architecture du pois protéagineux. Cette variété à grain jaune, en effet, assez haute, porte ses gousses sur le dessus de la plante et a une floraison groupée.

2001, '**Lumina**' (Cebeco Seeds, Pays-Bas), variété de type *afila* de précocité moyenne, à grain lisse jaune très gros.

2001, '**Hardy**' (Serasem, France), variété de type *afila* tardive, à grain lisse jaune très gros.

Variétés d'hiver

1973, '**Frimas**' (INRA, France), première variété de pois protéagineux d'hiver. Cette variété à grain jaune s'est distinguée par sa bonne tolérance au froid, ce qui lui a permis d'être cultivée dans des régions telles que la Champagne. Ce progrès a pu être accompli grâce aux travaux d'introduction de la résistance au froid venant du pois fourrager.

1979, '**Frisson**' (INRA, France), variété à grain jaune plus productive et plus résistante aux maladies que 'Frimas'. Elle est, de plus, très performante dans les zones arides de l'Inde.

1991, '**Rafale**' (INRA, France), première variété de pois protéagineux d'hiver de type *afila*.

1992, '**Victor**' (Pioneer France Maïs, France), variété feuillue à grain jaune se caractérisant par une résistance au gel et un rendement grandement améliorés par rapport à ceux des variétés de l'époque.

1998, '**Cheyenne**' (GAE Recherche, France), variété de pois protéagineux de type *afila*, très tardive et résistant mieux au froid que 'Rafale'. C'est une variété à grain lisse jaune moyen qui se caractérise surtout par une bonne tenue de tige.

2000, '**Lucy**' (GAE Recherche, France), variété de type *afila*, tardive et à grain lisse vert petit.

2004, '**Isard**' (INRA, France), variété de type *afila* à grain jaune très productive, résistante à la verse et particulièrement résistante au froid.

Remarque. Les caractères mendéliens du pois sont très nombreux et ils ont chacun une grande variabilité. L'amélioration de l'espèce a permis d'obtenir des nouvelles combinaisons génétiques, ce qui s'est traduit par une hausse sensible de la diversité.

Pourtant, à l'intérieur d'un même type, comme dans le cas du pois protéagineux par exemple, les variétés sont souvent très proches, ce qui rend leur distinction difficile. Il existe, dans le monde, plusieurs milliers de variétés de pois.

Regard sur 50 ans de sélection

Connu sous l'Antiquité et utilisé de tous temps essentiellement comme légume sec, le pois en tant que légume frais est plus récent.

Le développement des programmes d'amélioration du pois de conserve est parallèle au développement de l'industrie d'appertisation. À partir des années 1950, des efforts notoires ont été réalisés sur la résistance aux maladies et la précocité. Ce dernier critère répondait à une demande expresse de la conserverie qui souhaitait amortir ses chaînes d'emboîtement sur une période plus longue. Il était exclu d'utiliser du matériel trop tardif dont le traitement industriel aurait été concurrent du traitement du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) de conserve. Seul, du matériel précoce pouvait donc convenir. C'est dans ce contexte que furent créées sans succès, dans les années 1970, les premières variétés de pois d'hiver. Ces variétés devaient s'avérer plus productives que les variétés de printemps très précoces. Mais, soumises à d'importants aléas climatiques au cours de l'hiver et caractérisées par une forte hétérogénéité du produit récolté, elles furent rapidement abandonnées. Cependant, l'histoire du pois d'hiver venait de naître.

La recherche sur le pois protéagineux qui n'a pas 30 ans, a pu profiter des progrès réalisés chez le pois potager et le pois de conserve et exploiter la résistance au froid présente chez certaines variétés de pois fourrager. Cette recherche a été stimulée par la nécessité de relever le défi pour l'approvisionnement européen en protéines pour l'alimentation animale, suite à l'embargo des États-Unis sur le soja, en 1973. Les sélectionneurs ont alors testé, dans un contexte de grain sec, tout le matériel végétal disponible et de nombreuses plates-formes expérimentales furent mises en place un peu partout en France autour des années 1974-75. La variété de casserie 'Finale' (variété de type printemps) fut ainsi remarquée, mais son exploitation comme pois protéagineux s'avéra difficile. Malgré de bonnes performances agronomiques à l'époque, son manque de résistance à la verse et les difficultés de récolte ne permirent pas au pois protéagineux de se développer. Il a fallu attendre l'innovation apportée avec le gène *afila* (transformation des feuilles en vrilles conférant une résistance à la verse) pour assister à l'augmentation des surfaces. La première variété inscrite fut la variété 'Solara' (version *afila* de la variété 'Finale') en 1984.

Au fil des années, les travaux des sélectionneurs sur la résistance à la verse et l'amélioration de la qualité permirent de développer de nouvelles variétés plus performantes.

Le pois de type d'hiver, qui avait été créé, dans les années 1970, avec un objectif de conserverie, fut aussi à l'époque, testé en grain sec. Si les performances

agronomiques étaient intéressantes, les cultures étaient régulièrement détruites par le gel, malgré un bon niveau de résistance au gel. Cette résistance provenait, en fait, d'un échappement par maintien à l'état végétatif pendant l'hiver. Ce caractère de blocage de stade, mal maîtrisé dans certaines conditions hivernales, était souvent contourné au cours de l'hiver et il en résultait d'importants dégâts de froid. Ces types hiver présentaient également une forte sensibilité à l'antracnose (due à *Mycosphaerella pinodes*). Pour ces différentes raisons, la surface de pois d'hiver est, dès lors, restée limitée à 20 000 – 40 000 ha et cantonnée, soit dans des zones « au sud » où le risque de gel tardif est exclu, soit plus « au nord » avec une date de semis très tardive pour assurer un passage « végétatif » au cours de l'hiver. Ces conditions excluaient tout développement de la culture.

Caractères importants améliorés

Pois protéagineux

Rendement et résistance à la verse. Il connaît une augmentation considérable : en 1970, le rendement moyen en pois sec était de 15 q/ha alors qu'il est de 47 q/ha en 2004. Sur 30 ans, l'amélioration annuelle du rendement des variétés de pois protéagineux de printemps est de + 0,6 q/ha. On estime que 50 % de ce progrès est dû au facteur génétique. Ceci résulte, en partie à la résistance à la verse apportée par le caractère *afila* qui rend le pois plus facilement récoltable, et en partie à une meilleure adéquation entre le développement de la plante entière et des parties reproductrices, autrement dit par la réduction de la surface foliaire (cf. l'encadré ci-dessous).

Résistance au froid. Une résistance au froid présente dans une variété de pois fourrager ('Champagne') a d'abord été introduite dans un pois de casserie de printemps. Ce pois de casserie résistant au froid ainsi obtenu s'est avéré intéressant pour le rendement et la teneur en protéines de la graine, à une époque où

La mutation *afila*

Cette mutation transforme les folioles de la feuille en vrilles, mais respecte le développement des stipules, réduisant ainsi la surface foliaire de plus de 40 %. Les lignées de type *afila* se distinguent de leurs lignées isogéniques à feuillage « normal » par un gain de rendement pouvant aller jusqu'à 20 % et par une meilleure résistance à la verse. La mutation *afila* a été décrite en 1965 et la première variété de type *afila* en Europe, 'Solara' (Cebeco-Handelsraad, Pays-Bas), a été diffusée en 1986. Actuellement, la très grande majorité des variétés de pois protéagineux sont de ce type. La mutation *afila* est très certainement le caractère génétique qui a le plus modifié l'aspect et les performances agronomiques du pois protéagineux. En outre, le type *afila* apporte, grâce à une meilleure aération du couvert, une meilleure tolérance à différents parasites notamment fongiques.

Il existe une autre mutation, la mutation *stipuleless* (absence de stipule), qui a pour effet de transformer les stipules en bractées de manière à obtenir des variétés absolument sans feuille (c'est-à-dire avec des stipules réduites et des vrilles présentes), mais elle est sans grand intérêt agronomique.

l'on cherchait des variétés pouvant être utilisées comme pois protéagineux. C'est ainsi que furent obtenues les premières variétés de pois protéagineux d'hiver.

Avec un cycle plus long, les variétés de pois protéagineux d'hiver sont plus productives et plus régulières que les variétés de printemps, du fait de leur récolte précoce. Ces pois fleurissent à une période où la température est basse. Les problèmes de stress hydriques de sécheresse sont ainsi limités et les besoins en irrigation sont moindres, ce qui représente un autre avantage.

Pois de conserve

Allongement de la période de récolte. Les industries de la conserverie souhaitent garder leurs usines ouvertes le plus longtemps possible. Des variétés de différentes précocités ont été créées de manière à pouvoir alimenter les usines pendant deux mois.

Maturité groupée. Des variétés ont été sélectionnées de manière à concentrer la récolte dans la plante sur peu d'étages reproducteurs de façon à avoir un maximum de grains du même âge physiologique.

Qualité « extra-fins » : calibre et tendreté. Pour la conserve, les petits pois les plus recherchés sont les plus fins et les plus tendres. Ces deux qualités sont celles des pois jeunes, car ils sont de petit calibre. Tout naturellement, le critère « extra-fins » est devenu le principal signe de qualité. Les sélectionneurs ont créé des variétés à faible calibre qui permettent de produire des « extra-fins » avec un haut rendement. Cependant, les pois de ces variétés étant récoltés tardivement, ceux-ci deviennent durs et donc perdent en qualité. Dans le cas du pois de conserve, l'augmentation de rendement s'est accompagnée, pendant un temps, d'une baisse de la qualité. Pour remédier à cette situation, le critère de tendreté (évalué avec un tendéromètre) est maintenant pris en compte en conserverie à la réception des lots de pois et pour leur règlement à l'agriculteur (un produit de qualité a un indice tendérométrique inférieur à 120).

En 20 ans, la sélection a permis de doubler le rendement : celui-ci est passé de 40-45 q/ha en poids frais de grains immatures avec 20 % de grains de calibre extra-fin en 1980, à 80 q/ha actuellement, avec 90 % de grains de calibre extra-fin.

Tous types de pois

Résistance aux maladies

Anthraxnose. Cette maladie est provoquée par un complexe de trois espèces de champignons, *Ascochyta pisi*, *Mycosphaerella pinodes* (considéré comme le plus dommageable en culture) et *Phoma medicaginis* var. *pinodella*. Un gène de résistance à *Ascochyta pisi*, découvert dans la variété 'Rondo' dès 1965 et introduit systématiquement dans les variétés récentes de pois protéagineux, confère la résistance à 6 races sur 7. La variété de pois de conserve 'Gulliver' (Vilmorin, France, inscrite en 1958) résiste aux 7 races. Aujourd'hui, il n'existe aucune variété cultivée de pois résistante à *M. pinodes* ou à *P. medicaginis*.

Fusariose. *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi* est un champignon vasculaire qui comporte plusieurs races. Des gènes efficaces de résistance ont été trouvés contre les races 1, 2, 5 et 6. La résistance à la race 1 est présente dans les variétés récentes.

Graisse. Il existe 6 gènes conférant respectivement une résistance aux 6 races de *Pseudomonas syringae*, bactérie responsable de cette maladie.

Mildiou du pois (*Peronospora pisi*). Une résistance trouvée dans la variété 'Star-nain' confère une résistance contre 6 races de mildiou.

Mosaïque commune. Un gène confère une résistance, stable depuis sa découverte, à la mosaïque commune provoquée par deux virus, celui de la mosaïque jaune du haricot (*Bean yellow mosaic virus*, BYMV) et celui de la mosaïque commune du pois (*Pea common mosaic virus*, PCMV). Cette résistance est surtout présente dans les variétés à grain ridé car les géniteurs de ces variétés sont résistants.

Oïdium (*Erysiphe polygone* f. sp. *pisi*). Un gène, découvert en 1965 dans une population mexicaine, confère une résistance stable à cet agent pathogène.

Mosaïque du pois transmise par la graine (*Pea seed-borne mosaic virus*, PSBMV). Cette virose, qui provoque une légère mosaïque, un enroulement des feuilles et des ornements sur le grain s'est récemment développée. Trois gènes de résistances ont été trouvés. Afin d'augmenter la durée de la résistance à ce virus, la combinaison de plusieurs types de résistance a été recherchée en introduisant par transgénèse, soit le gène de la capsid du virus, soit le gène *NIb* de la réplicase.

Qualités nutritionnelles pour l'animal. Les variétés à grain ridé sont très riches en parois et assez riches en stachyose et verbascose qui, comme tous les α -galactosides, sont fermentescibles, flatulents et diminuent l'assimilation des protéines. Ces défauts interdisent d'utiliser ce type de variété pour la nutrition animale. Les variétés protéagineuses actuelles sont à grain lisse et pauvres en facteurs anti-trypsiques. Ces substances nuisent à la digestibilité chez le porc. Certaines variétés de pois d'hiver présentent une activité antitrypsique comprise entre 6 et 15 UTI/mgMS (UTI : Unité d'inhibiteurs trypsiques). Ce caractère semble provenir de la variété de pois fourrager 'Champagne'. Des études génétiques ont montré une hérédité simple pour ce caractère (un locus majeur), des possibilités de sélectionner pour un abaissement de la teneur en facteurs anti-trypsiques (3 à 5 UTI) et d'utiliser pour cela un marqueur moléculaire. L'activité antitrypsique étant détruite par la chaleur, ce caractère n'a pas été pris en compte dans la sélection pour l'alimentation humaine qui utilise toujours des procédés de cuisson.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation de mutations spontanées	OUI Les caractères de couleur (vert ou jaune) ou d'aspect (lisse ou ridé) du grain sont à la base de l'élaboration des principes de la génétique par G. Mendel. La mutation <i>afila</i> a révolutionné la culture du pois ('Solara').
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI à l'étranger 32 variétés contenant des caractères apportés par mutagenèse sont répertoriées par la FAO/IAEA en 2000. Des équipes polonaises ont créé près de la moitié de ces variétés. Les caractères qui ont été ainsi introduits sont aussi variés que le type de feuille « afila », la dureté du grain, la précocité, la tardiveté, la croissance de type déterminé ou la résistance à la verse.
Croisements interspécifiques	AUCUN
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS L'élévation du niveau de ploïdie a été réalisée en vue d'études fondamentales, sans application variétale.
Transgénèse	Les premiers pois transgéniques ont été obtenus en 1990. La transformation du pois, assez délicate et nécessitant encore un certain nombre de travaux de mise au point, reste un outil principalement utilisé pour des recherches fondamentales. Des pois résistants aux insectes ont été produits en exprimant un gène inhibiteur de l'α-amylase. De même, la surexpression de gènes codant la protéine de l'enveloppe, a permis l'obtention de plantes résistantes au virus de la mosaïque de la luzerne. Le gène de la capsid du <i>Pea seed-borne mosaic virus</i> et le gène <i>Nlb</i> de la réplicase ont également été introduits par transgénèse. Quatre essais au champ de pois transgéniques ont été réalisés aux États-Unis avant 2000. Il y a de nombreux essais au champ en Australie de pois transgéniques résistants aux insectes.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	AUCUNE
Sélection sanitaire	AUCUNE en France OUI au Canada Toute la collection de variétés cultivées au Canada a fait l'objet d'une culture de méristèmes <i>in vitro</i> pour éliminer le <i>Pea seed-borne mosaic virus</i> dans les années 1980.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE Il existe des stérilités mâles nucléaires, mais elles ne sont pas utilisées.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE

suite...

... suite

Marquage moléculaire

EN COURS

On dispose actuellement de certains marqueurs moléculaires de type microsatellites issus de gènes de fonction connue : précocité, résistance aux maladies, sensibilité à la photopériode et gènes régulant la teneur en facteurs antitrypsiques. Pour les caractères plus complexes, la stratégie de recherche de QTL est appliquée, accompagnée de la recherche des déterminants physiologiques et biochimiques identifiants dans les QTL.

Le marquage moléculaire est en cours d'intégration dans les programmes de sélection. Le premier caractère ainsi suivi est celui de l'activité antitrypsique.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection

Sélection généalogique différée ('Baccara',...)

Sélection par filiation monograin (SSD)

Les croisements dialèles ont été utilisés pour introduire des caractères quantitatifs comme la précocité ('Frisson').

Les croisements circulaires et la sélection récurrente ont permis d'introduire des résistances au froid et d'accumuler plusieurs gènes de résistances aux maladies.

Types variétaux

Variété lignée pure. Toutes les variétés sont des lignées pures.

Il faut signaler que la réalisation de **variétés hybrides** serait difficile en raison de la cléistogamie de la fleur, de la présence d'un pollen lourd et collant et de l'absence de systèmes de contrôle de la fécondation croisée.

Perspectives d'amélioration

Si la sélection du pois de conserve concerne plusieurs états de l'Union européenne, la sélection du pois protéagineux est fortement concentrée sur la France.

Dans le cas du pois de conserve lié à un petit marché étroitement contrôlé par les industriels, les progrès génétiques sont lents, d'autant plus lents que les exigences des industriels sont très variables en fonction des différents marchés de consommation. Qu'il soit à grain lisse ou à grain ridé, les exigences gustatives pour le pois sont très importantes et parfois difficilement mesurables. Avec une surface totale d'environ 40 000 ha, le paysage du matériel végétal est actuellement constitué d'un nombre important de variétés, chacune avec une part de marché étroite.

Concernant le pois protéagineux, malgré des besoins importants (déficit en protéines végétales au niveau européen de l'ordre de 70 %), les emblavements de pois de printemps pour la récolte en sec ne cessent de chuter. Les raisons sont multiples : elles sont liées non seulement au contexte économique, international et européen, mais aussi liés à des années de production difficiles en liaison avec les conditions climatiques et le développement de certains parasites difficilement contrôlables. Le pois d'hiver pourrait permettre de gagner des zones de culture nouvelles dans le centre et l'est de la France et de se substituer à une

partie du pois de printemps dans des zones où ce dernier présente des performances insuffisantes. La solution à ce problème s'est dessinée au milieu des années 1990, avec la mise en évidence d'un gène de régulation hivernale dans une population fourragère française ('Champagne'). Ce gène *Hr* de réactivité à la photopériode confère à la plante une réelle stratégie d'échappement à l'hiver, en permettant un blocage de la croissance, de l'initiation florale et en maintenant la plante à l'état végétatif durant tout l'hiver. Ce gène ayant été introduit, cette nouvelle construction est actuellement expérimentée en France. Elle constitue désormais une alternative intéressante dans la culture du pois protéagineux. Les premières lignées devraient être commercialisées à la fin des années 2008-2010. Un travail de co-construction de ce matériel végétal entre recherche publique et recherche privée française est en cours. Si les premières lignées de ce type avec un bon potentiel agronomique existent dès aujourd'hui, il reste à valider l'hypothèse dans un réseau national plus large et à faire ainsi ressortir les avantages et inconvénients de la construction actuelle. Cette interactivité et cette pluridisciplinarité devraient favoriser la définition d'un idéotype cultural (ou de plusieurs idéotypes culturels). Les prochaines années seront décisives dans ce domaine.

Caractères à améliorer

Pois potager

Diversification. De nouveaux produits pourraient être créés comme, par exemple, des variétés de pois mangetout sans fil.

D'autre part, il existe trop peu de variétés de type « sucré » ou *sweet* (déterminé par le gène *rb* (*ridé b*)) :

- avec de grandes gousses et de gros grains,
- à la fois riches en amylose et d'une saveur sucrée très agréable.

Si de telles variétés étaient proposées, elles connaîtraient certainement un grand succès auprès des consommateurs.

Pois de conserve

Qualité gustative. Il faudrait créer des variétés de pois de conserve de type « sucré » pour une meilleure qualité gustative à amidon particulier de type « *rb* ».

Pois protéagineux

Résistances aux maladies. La maladie la plus préoccupante est actuellement l'anthracnose causée par *Aphanomyces euteiches* et principalement par *Mycosphaerella pinodes*. Aujourd'hui, il n'existe aucune variété cultivée résistante à *Aphanomyces euteiches* et/ou à *Mycosphaerella pinodes* dans le monde. Toutefois, des sources de résistance quantitative, dont le déterminisme génétique est complexe, sont disponibles pour les deux parasites. Ces sources sont utilisées dans des analyses génétiques et pour la création de géniteurs en vue de cumuler, éventuellement à l'aide de marqueurs moléculaires, des gènes mineurs pour améliorer l'efficacité de la résistance. Dans les deux cas, la résistance est partielle et devra

être intégrée à d'autres stratégies de lutte (culturales ou prophylactiques) contre ces parasites. Par ailleurs, l'intégration dans les variétés françaises des gènes de résistance à *Ascochyta pisi*, agent de l'oïdium et à la race 1 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *psii*, agent des fusarioses, se poursuit.

Création de pois d'hiver de type hiver. Les variétés actuelles de type hiver sont en réalité des variétés peu sensibles à la photopériode. Des variétés fortement sensibles à la photopériode sous l'effet du gène *Hr* sont en train d'être créées. Les premières variétés de pois de ce type sont attendues pour 2008-2010, avec des performances agronomiques intéressantes.

Qualité et teneur en protéines. La teneur totale en protéines du grain et la digestibilité des différentes fractions protéiques doivent être augmentées de façon à amplifier l'utilisation du pois dans les élevages de porcs et volailles, et cela sans perte de rendement. Des géniteurs présentant des teneurs voisines de 28 à 30 % de la MS graine sont disponibles chez le pois à grain lisse. Des démarches de dissection génétique (QTL) et analyse de ces caractères sont en cours actuellement, notamment en liaison avec l'analyse génétique de l'efficacité des voies d'acquisition de l'azote par la plante (fixation symbiotique et assimilation).

Inscription et protection des variétés en France

1952, création du catalogue pois potager.

1961, description, par arrêté ministériel, des conditions d'inscription des variétés de plantes fourragères.

1976, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique pois protéagineux.

1980, décision de classement, par arrêté ministériel, des variétés de pois ayant subi avec succès les épreuves fixées par le règlement technique dans une rubrique pois protéagineux dans la liste ouverte au catalogue officiel au titre des pois fourragers.

En 2003, le catalogue français comprenait 127 variétés de pois potager, 4 variétés de pois fourrager et 123 variétés de pois protéagineux. Cette même année, 974 variétés de pois potager et 280 variétés de pois protéagineux (ou fourragers) étaient inscrites sur le catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne.

Pour les variétés de pois potager, comme pour les autres espèces potagères, il existait une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation jusqu'en décembre 2004, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 73 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant

les principes directeurs de l'UPOV, 23 d'entre eux étant des caractères nationaux additionnels. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de ces 2 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des pays de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, une variété de pois protéagineux ou de pois fourrager doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Les 3 variétés les plus multipliées l'année précédant la demande d'inscription, constituent les témoins de référence pour le rendement. Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le catalogue est un facteur d'orientation positif pour l'inscription de variétés originales. Par son règlement technique, le CTPS a contribué à orienter avec succès les pois protéagineux français vers des formes « zéro-tannin », faibles en facteurs antitrypsiques et riches en protéines.

Compte tenu de la faible importance économique de la filière, la segmentation du marché en sous-produits et en sous-catalogues n'a pas été mise en place.

Le CTPS a contribué à orienter la sélection du pois protéagineux en adaptant les protocoles expérimentaux, en faisant varier les critères d'inscription et en établissant une cotation pour le jugement de la VAT avec des systèmes de bonification / pénalité et des seuils éliminatoires.

Systèmes de bonification / pénalité

La cotation d'une variété dépend, non seulement de son rendement, mais aussi de certains critères tels que la teneur en protéines, le poids de 1 000 grains et l'activité antitrypsique. À ces critères, sont attachées des bonifications ou des pénalités.

Seuils éliminatoires

Pour les facteurs antitrypsiques, si la variété présente une activité antitrypsique supérieure de 2 UTI/mg MS par rapport à la moyenne de celles des témoins, l'inscription au catalogue officiel de la variété est refusée.

Dans le cas du pois d'hiver, si le comportement vis-à-vis du froid de la variété est significativement inférieur à celui de la variété témoin retenue pour la résistance au froid, l'inscription au catalogue officiel de la variété de pois d'hiver est refusée.

Pour la teneur en protéines, une teneur de 6 % inférieure à celle des témoins est éliminatoire.

Pour en savoir plus

Site internet des ressources génétiques du pois à l'INRA : <http://www.inra.fr/legumineuses/>

Atta S., Maltèse S., Marget P. et Cousin R., 2004. $^{15}\text{NO}_3$ assimilation by the field pea *Pisum sativum* L. *Agronomie*, 24, 1-8.

Baranger A., Aubert G., Arnau G., Lainé A.L., Deniot G., Potier J., Weinachter C., Lejeune I., Lallemand J. et Burstin J., 2004. Genetic diversity within *Pisum sativum* using protein and PCR-based markers. *Theor. Appl. Genet.*, 108, 1309-1321.

Burstin J., Deniot G., Potier J., Weinachter C., Aubert G. et Baranger A., 2001. Microsatellite polymorphism in *Pisum sativum*. *Plant Breed.*, 120, 311-317.

Bhattacharyya M.K., Smith A.M., Noel Ellis T.H., Hedley C. et Martin C., 1990. The wrinkled-seed character of pea described by Mendel is caused by a transposon-like insertion in a gene encoding starch-branching enzyme. *Cell*, 60, 115-122.

Casey R. et Davies D.R., 1993. *Peas : genetics, molecular biology and biotechnology*. CAB International, Wallingford, 323 p.

Chaux C. et Foury C., 1994. Petit pois ou pois potager. Dans : *Productions légumières*, tome 3. Tec & Doc, Paris, 17-74.

Cousin R., 1974. *Le pois. Étude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français*. INRA Éditions, Paris, 111 p.

Cousin R., 1976. Amélioration génétique du pois d'hiver. *Ann. Amélior. Plant.*, 28 (2), 253-263.

Cousin R., 1983. Breeding for yield and protein content in pea. Dans : *Perspectives for Peas and Lupins as Protein Crops*. R. Thompson et R. Casey, éd., Martinus Nijhoff, The Hague, 146-164.

Cousin R., 1992. Le pois. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*, A. Gallais et H. Bannierot, éd., INRA Éditions, 173-188.

Cousin R., 1999. L'amélioration du pois. Dans : *Technologie des légumes*. Tec & Doc, Paris, 153-185.

Cousin R., 2003. Pois. Dans : *Histoires de légumes, des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 347-361.

Dirlewanger E., Isaac P.G., Ranade S., Delajouza M., Cousin R. et de Vienne D., 1994. Restriction fragment length polymorphism analysis of loci associated with disease resistance genes and developmental traits in *Pisum sativum* L. *Theor. Appl. Genet.*, 88 (1), 17-27.

GEVES, 1995. *Description et classification des variétés de pois*. Manuel avec mise à jour à échéance régulière. GEVES, Guyancourt, 556 p.

Goldenberg J.F., 1965. Afila, a new mutation in pea. *Bol. Genet.*, 1, 27-28.

Hagedorn D.J., 1973. Peas. Dans : *Breeding Plants for Disease Resistance Concepts and Applications*, The Pennsylvania State University Press, University Park and London, 326-343.

Jacobsohn A., 2001. Le petit pois. Histoire d'un pois qui devient petit. *Jard. Fr.*, novembre, 18-20.

Laucou V., Haurogné K., Ellis N. et Rameau C., 1998. Genetic mapping in pea. 1. RAPD-based genetic linkage map of *Pisum sativum*. *Theor. Appl. Genet.*, 97 (5/6), 905-915.

Mendel G., 1865. Versuche über Pflanzenhybriden. *Verh. Natur. Ver. Brünn*, 4, 3-47.

Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R., 1991. Maladies du pois et de la fève. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*, INRA Éditions, Paris, 291-305.

Moule C., 1973. Le pois. Dans : *Plantes sarclées et diverses*. La Maison rustique, Paris, 15-23.

- Page D., Aubert G., Duc G., Welham T. et Domoney C.**, 2002. Combinatorial variation in coding and promoter sequences of genes at the Tri locus in *Pisum sativum* accounts for variation in trypsin inhibitor activity in seeds. *Mol. Genet. Genomics*, 267, 359-369.
- Péron J.-Y.**, 1999. Le pois d'industrie. Dans : *Productions légumières, références*. Synthèse agricole, Bordeaux, 480-490.
- Pilet-Nayel M.L., Muehlbauer F.J., McGee R.J., Kraft J.M., Baranger A. et Coyne C.J.**, 2002. Quantitative trait loci for partial resistance to *Aphanomyces* root rot in pea. *Theor. Appl. Genet.*, 106, 28-39.
- Prioul S., Frankewitz A., Deniot G., Morin G. et Baranger A.**, 2004. Mapping of Quantitative Trait Loci for partial resistance to *Mycosphaerella pinodes* in pea (*Pisum sativum* L.) at the seedling and adult plant stages. *Theor. Appl. Genet.*, 108, 1322-1334.
- Puonti-Kaerlas J., Eriksson T. et Engstrom P.**, 1990. Production of transgenic pea (*Pisum sativum* L.) plants by *Agrobacterium tumefaciens* mediated gene transfer. *Theor. Appl. Genet.*, 80 (2), 246-252.
- Rameau C., Denoue D., Fraval F., Haurogné K., Josserand J., Laucou V., Batge S. et Murfet I.C.**, 1998. Genetic mapping in pea. 2. Identification of RAPD and SCAR markers linked to genes affecting plant architecture. *Theor. Appl. Genet.*, 97 (5/6), 916-928.
- Roux-Duparque M.**, 2001. La recherche sur *Aphanomyces* se poursuit. *Unilet Inf.*, 110, 19-21.
- Shade R.E., Pueyo J.J., Tabe L.M., Murdock L.L., Higgins T.J.V. et Chrispeels M.J.**, 1994. Transgenic pea seeds expressing the alpha-amylase inhibitor of the common bean are resistant to bruchid beetles. *Bio/technology*, 12 (8), 793-796.
- Snoad B.**, 1974. A preliminary assessment of leafless peas. *Euphytica*, 23, 257-265.
- Timmerman-Vaughan G.M., McCallum J.A., Frew T.J., Weeden N.F. et Russell A.C.**, 1996. Linkage mapping of quantitative trait loci controlling seed weight in pea (*Pisum sativum* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 93 (3), 431-439.
- Timmerman-Vaughan G.M., Pither-Joyce M.D., Cooper P.A., Russell A.C., Gouden D.S., Butler R. et Grant J.E.**, 2001. Partial resistance of transgenic peas to alfalfa mosaic virus under greenhouse and field conditions. *Crop Sci.*, 41 (3), 846-853.
- Timmerman-Vaughan G.M., Frew T.J., Russell A.C., Khan T., Butler R., Gilpin M., Murray S. et Falloon K.**, 2002. Mapping of partial resistance to field epidemics of *Ascochyta* blight of pea. *Crop Sci.*, 42 (6), 2100-2111.
- Zohary D. et Hopf M.**, 2000. *Domestication of plants in the Old World. The origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe and the Nile Valley*. Oxford Univ. Press., Oxford, 316 p.

La pomme de terre

Solanum tuberosum L. ($2n = 4x = 48$)
(Solanacées)

Présentation de l'espèce

Le genre *Solanum* L., auquel appartient la pomme de terre, *Solanum tuberosum* L., comprend 1 000 espèces dont plus de 200 sont tubéreuses. On rencontre principalement 8 espèces cultivées dont les espèces diploïdes *S. phureja* Juz. & Buk. et *S. stenotomum* Juz. & Buk. Les zones d'origine et de diversification s'étendent du nord du Chili au sud-ouest des États-Unis.

La pomme de terre a été domestiquée en Amérique du Sud autour de 8 000 ans av. J.-C. Il s'agissait d'abord d'espèces sauvages diploïdes. Leurs tubercules ayant un goût amer et contenant une quantité plus ou moins importante d'alcaloïdes, les premiers pas dans l'adaptation de ces végétaux ont dû être la reconnaissance et la sélection, par les hommes pratiquant la cueillette, de clones et variétés populations (graines) moins amers et moins toxiques et que l'on continue d'ailleurs à produire en altitude au Pérou et en Bolivie.

Ensuite, et progressivement, les Amérindiens choisirent des pommes de terre avec un feuillage plus développé et des tubercules plus gros. Et ce sont ces pommes de terre que les Européens découvrirent aux XV^e et XVI^e siècles lors de la conquête de l'Amérique du Sud. La pomme de terre fut probablement introduite en Europe quelques années avant la fin du XVI^e siècle par deux voies différentes : l'Espagne, *via* les Canaries, vers 1570 et les Îles britanniques entre 1588 et 1593. Le développement de cette culture eut lieu en effet dans les régions non gélives. La diffusion de cette plante est ensuite due, d'une part à Charles de l'Écluse à travers les jardins botaniques européens, d'autre part à la guerre de Trente ans, commencée en 1617 à travers l'Europe. En Irlande, les premières mentions de sa culture datent de 1606 et dès la fin du XVIII^e siècle, l'économie irlandaise reposait essentiellement sur la pomme de terre, avec, selon A. Young, une consommation quotidienne de 3,5 kg par personne !

En France, elle fut introduite par plusieurs chemins : *via* le Dauphiné, la Franche-Comté, les Vosges lorraines et les Flandres, et elle connut une certaine extension au cours du XVIII^e siècle, mais en étant considérée comme une production destinée aux populations les plus pauvres et même, pour certains, susceptible de propager la lèpre.

L'adaptation progressive aux conditions de photopériodes longues s'est produite au cours des deux cents ans suivant l'introduction de la pomme de terre en Europe, par semis de graines des variétés d'origine d'une part, et par une nouvelle introduction à partir du XVIII^e siècle, de variétés du Chili tubérisant en photopériodes longues, d'autre part. La sélection variétale commence donc au XVIII^e siècle, en prenant en compte la précocité (les plantes sont de ce fait de taille plus réduite, alors que les tiges des pommes de terre décrites par O. de Serres étaient de 1,80 m) et le rendement. La pratique du semis de graines, à partir de 1760, a permis d'exploiter la variabilité génétique des quelques variétés dont certains Européens disposaient et de pratiquer une « régénération » de ces variétés pour les guérir des virus, créant *de facto* inconsciemment de nouvelles variétés. En 1777, plus de 40 variétés sont décrites dans le supplément de l'Encyclopédie. Simultanément, quelques nouvelles introductions ont eu lieu.

A.-A. Parmentier, pharmacien et nutritionniste, a approfondi ses connaissances sur la pomme de terre alors qu'il était prisonnier des Prussiens pendant la guerre de Sept Ans et a promu cette culture auprès du pouvoir politique (Louis XVI et sa Cour), du pouvoir scientifique (A.-L. de Lavoisier, A. Young, B. Franklin) et enfin auprès des citoyens. Sur ses instances, 11 variétés venant d'Amérique du Nord seront acclimatées dans le domaine royal de Rambouillet.

Le catalogue Vilmorin comporte 630 variétés en 1846. L'accroissement de la culture de la pomme de terre s'est accompagné du développement d'un certain nombre de parasites et de ravageurs. Deux d'entre eux, un champignon et un insecte, ont eu des conséquences particulièrement importantes. Le mildiou (*Phytophthora infestans*) a entraîné de terribles famines en Irlande à partir de 1845, causant la mort de 1,5 million de personnes et l'émigration d'un autre million vers l'Amérique du Nord. Le doryphore (*Leptinotarsa decemlineata*) a causé, au XX^e siècle, de très graves dégâts aux États-Unis, puis en Europe.

La pomme de terre la plus cultivée à travers le monde est une espèce tétraploïde herbacée, à multiplication végétative par tubercules. Elle est conduite comme une plante annuelle lorsqu'elle est cultivée bien que spontanément pérenne, le gel, les virus et autres parasites nuisant en effet gravement à une conduite pérenne.

Le pollen est lourd et les fleurs n'ont pas de nectaires. La pomme de terre est, de plus, dans nos conditions, très fortement mâle stérile. En Europe, elle ne peut se croiser avec les espèces sauvages de *Solanum*. En revanche, les fécondations croisées sont fréquentes dans le centre de diversification d'Amérique du Sud.

Il existe plusieurs collections d'espèces apparentées à la pomme de terre. Les plus connues sont à l'université de Madison à Sturgeon Bay (États-Unis), au *Centro internacional de la papa* (CIP) à Lima (Pérou), au PRI (*Plant Research International*) à Wageningen (Pays-Bas), au SCRI à Dundee (Royaume-Uni), au VIR près de Saint-Petersbourg (Russie) et à l'INRA de Ploudaniel (France). Elles ont été constituées par de nombreuses expéditions internationales en Amérique centrale et du Sud depuis 1925. Les méthodes de maintien sont diverses : par semences, par culture des tubercules en plein champ ou en serre, par bouturage *in vitro* ou même par cryoconservation. En général, une partie est virosée, ce qui limite les échanges qui doivent satisfaire aux exigences des règlements phytosanitaires et imposent des passages en quarantaine. L'utilisation de graines limite, pour partie, les risques sanitaires, bien que celles-ci doivent aussi aller en quarantaine. La collection INRA de Ploudaniel (Finistère-Nord) comporte 2 600 génotypes en plein champ et 1 700 génotypes *in vitro* (depuis 1987).

Production et utilisation

Le produit récolté, la pomme de terre, est un tubercule, extrémité tubérisée d'un stolon (tige souterraine).

La pomme de terre est cultivée dans plus de 150 pays et elle occupe le 4^e rang des productions végétales directement utilisées en alimentation humaine. Les producteurs les plus importants sont la Chine, la Russie, la Pologne, l'Europe de l'Ouest, l'Inde et les États-Unis. La production de pomme de terre est de plus de 328 millions de tonnes dans le monde et de 7,3 millions de tonnes en France (données FAO, 2004).

Le tubercule de pomme de terre est une importante source d'amidon, mais cet aliment énergétique est moins consommé comme tel qu'auparavant. Il est maintenant beaucoup plus consommé comme légume d'accompagnement ou sous forme de produits transformés dans les pays où l'évolution des techniques en agriculture et dans l'industrie a entraîné une diminution de l'effort physique. La pomme de terre a longtemps constitué en Europe du Nord une source majeure de vitamine C.

Avec 70 kg par habitant et par an, la pomme de terre est le légume le plus consommé en France. Cette consommation a toutefois considérablement régressé puisqu'elle était de 140 kg avant 1940. La pomme de terre est surtout consommée à l'état frais : il faut distinguer la pomme de terre de primeur, récoltée avant maturité complète, de la pomme de terre de conservation qui peut être conservée pendant 8 à 10 mois.

Suivant leur mode d'utilisation, les variétés sont classées en trois catégories :

– variétés de consommation à chair ferme : cette pomme de terre, dont la chair reste ferme après cuisson, est utilisée à la vapeur ou sautée. Le petit calibre peut

être également valorisé selon un concept anglo-saxon (*baby potato*), en plein développement en Europe de l'Ouest ;

– variétés de consommation : cette pomme de terre est utilisée pour préparer de la purée, de la soupe, des frites, etc. Mais, elle est aussi transformée industriellement en frites surgelées, en flocons pour faire de la purée et en chips ;

– variétés féculières : cette pomme de terre constitue une matière première de l'industrie pour l'extraction de l'amidon (appelé fécule). Les variétés féculières en ont une teneur élevée (20 à 21 %) et les débouchés sont très variés (colle, papier, lubrifiant,...). Elle est éventuellement utilisée aussi comme matière première pour la production d'éthanol biocarburant.

Enfin, dans les pays scandinaves, elle sert à la fabrication d'eau-de-vie (aquavit).

Le tubercule de pomme de terre cru ou cuit a été utilisé en France jusque dans les années 1960 pour l'alimentation animale. Actuellement, cette utilisation concerne surtout les restes de triage et les déchets de l'industrie.

Selon le contexte d'utilisation, la pomme de terre est une plante de grande culture, une plante industrielle ou une plante maraîchère.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés de consommation à chair ferme

Les variétés citées ci-dessous correspondent à celles qui ont été inscrites avant 1995, afin de s'assurer d'un recul suffisant sur leur développement commercial.

XIX^e siècle, '**Belle de Fontenay**', variété précoce à chair jaune, très productive et de bonne conservation. Elle était très cultivée, notamment aux environs de Paris, au début du XX^e siècle. Elle le demeure encore actuellement dans l'Orléanais.

1935, '**Ratte**', variété ancienne dont les tubercules claviformes ont une chair très ferme. Son excellente qualité est appréciée par les gastronomes. Elle connaît un regain de développement.

1947, '**B.F.15**' (INRA, France), variété semi-précoce remarquable pour la fermeté de sa chair. Cette variété, issue d'un croisement entre 'Belle de Fontenay' et 'Flava', est encore cultivée.

1950, '**Roseval**' (Féd. synd. bret. de prod. de sem. de pom. de terre, France), variété à chair ferme et de couleur rouge qui est encore cultivée.

1981, '**Charlotte**' (Unicopa et Clause, France), variété se distinguant par une très bonne qualité culinaire (chair très ferme, bonne présentation). Son développement a été soutenu par un effort important de marketing. Elle constitue aujourd'hui la référence du marché de la pomme de terre à chair ferme en Europe.

1983, '**Nicola**' (Soltau-Berger, Allemagne), variété à chair ferme destinée à l'exportation.

1992, '**Pompadour**' (Comité Nord, France), variété à chair ferme de très bonne qualité culinaire.

1993, **'Franceline'** (Comité Nord, France), variété à peau rouge qui remplace progressivement 'Roseval'.

1994, **'Amandine'** (Clause Semences et Unicopa, France), variété de précocité équivalente à celle de 'Belle de Fontenay' et de très belle présentation en raison de sa peau fine et claire et de sa résistance à la gale commune. Elle possède une très bonne qualité de conservation. Son essor rapide (moins de 10 ans), est fortement appuyé par un système pionnier de distribution sélective qui renforce le contrôle du développement par l'obteneur en fixant un cahier des charges très strict de production et de commercialisation.

Variétés de consommation

1884, **'Institut de Beauvais'**, variété très productive à chair presque blanche.

1910, **'Bintje'** (de Vries, Pays-Bas), variété semi-précoce dont la polyvalence lui a assuré un succès international de près d'un siècle.

1911, **'Russet Burbank'**, variété américaine utilisée presque uniquement pour la fabrication de frites industrielles.

1952, **'Sirtema'** (Dorst, Pays-Bas), variété destinée à la commercialisation en primeur.

1955, **'Claudia'** (Clause, France), variété productive et rustique destinée à l'exportation.

1961, **'Ostara'** (Offereins, Pays-Bas), variété destinée à la commercialisation en primeur, peu sensible aux endommagements mécaniques (c'est-à-dire aux chocs en cours de récolte et de calibrage).

1967, **'Claustar'** (Clause, France), variété rustique et très productive, tête de file de l'exportation des plants français jusqu'au début des années 1990.

1967, **'Spunta'** (Oldenburger, Pays-Bas) variété très bien adaptée à la culture de primeurs dans le Bassin méditerranéen, ce qui lui vaut une carrière internationale en termes d'exportation de plants.

Ces deux dernières variétés, contemporaines et atypiques dans le contexte des programmes de sélection d'alors, démontrent l'intérêt d'avoir mis en place l'outil de sélection que constituent les réseaux d'essais multi-locaux et l'importance des interactions génotype × environnement chez la pomme de terre.

1969, **'Saturna'** (E. Scholten, Pays-Bas), variété féculière à l'origine. Elle est particulièrement adaptée à la fabrication de chips en raison de sa faible teneur en sucres réducteurs.

1970, **'Apollo'** (Levieil-Coop. de Lennon, France), historiquement une des premières variétés précoces ayant présenté une certaine résistance au mildiou.

1971, **'Désirée'** (Z.P.C., Pays-Bas), variété à peau rouge, rustique et de bonne conservation, destinée à l'exportation. Elle constitue également une référence importante dans les régions méditerranéennes et tropicales.

1972, '**Alcmaria**' (Verenigde Kweekbedrijven N.V., Pays-Bas), variété de primeur, historiquement une des premières variétés résistantes au nématode doré.

1977 '**Sahel**' (Coop. de Lennon et Clause, France), variété assez précoce et productive, dont les plants sont exportés dans les régions méditerranéennes et l'Afrique de l'Ouest.

1980, '**Aminca**' (B. Dankert, Pays-Bas), variété cultivée avec succès dans certaines régions de primeurs, notamment en raison de sa résistance au nématode doré.

1981, '**Lizen**' (INRA, France), variété précoce présentant une bonne résistance au mildiou en culture de primeurs.

1982, '**Monalisa**' (Van der Zee/Z.P.C., Pays-Bas), principale variété sur le marché de la pomme de terre lavée, en France.

1989, '**Agata**' (Geertsema, Pays-Bas), variété de primeur, très productive et de belle présentation.

1989, '**Agria**' (Bohm Kartoffelzucht, Allemagne), variété utilisée en Europe pour la transformation industrielle en frites.

1989, '**Samba**' (Unicopa et Clause SP, France), variété reconnue pour sa qualité culinaire qui se développe sur le marché de la restauration rapide comme « pomme au four ».

1991, '**Safrane**' (INRA, France), variété qui représente l'illustration de la construction d'idéotypes à partir des études de physiologie de la plante entière. Elle est particulièrement bien adaptée aux zones méditerranéennes où elle concurrence 'Spunta'.

1993, '**Duchesse**' (Grocep, France), variété précoce et de bonne qualité culinaire destinée à la production de primeurs.

2000, '**Eden**' (Bretagne Plants, France), variété productive présentant un progrès significatif en termes de résistance au mildiou du feuillage.

Variétés féculières

1965, '**Kaptah Vandel**' (Kartofellebondens Foraedlings Vandel, Danemark), variété la plus cultivée pour la production industrielle de féculé en France.

1969, '**Saturna**' (E. Scholten, Pays-Bas), variété inscrite dans la catégorie « féculières », mais essentiellement utilisée pour la transformation industrielle en chips. Elle présente une très bonne capacité de conservation (peu de pertes de poids et très faible teneur en sucres réducteurs).

1996, '**Florijn**' (H. Hoiting, Pays-Bas), première variété résistante au nématode à kyste *Globodera pallida* Pa 2-3.

Parmi les variétés féculières plus récentes, '**Centaure**' (1997, Comité Nord et GIPT, France), '**Amyla**' (1999, Germicopa, France) et '**Epona**' (2002, Comité Nord, France), connaissent un début de développement.

Remarque. Dans le monde, on peut estimer à 3 500 – 4 000 le nombre de variétés différentes cultivées. Leur diversité phénotypique et génotypique (comme le confirment les marqueurs moléculaires) est importante.

Par ailleurs, la biologie et la structure tétraploïde de l'espèce, la forte hétérozygotie des variétés et les nombreuses introgressions d'espèces apparentées sont autant d'éléments qui concourent à protéger la pomme de terre de l'érosion génétique.

Regard sur 50 ans de sélection

La nature tétraploïde de l'espèce et le déterminisme polygénique d'un grand nombre de caractères compliquent la ségrégation des caractères. De plus, le comportement de la plante est très influencé par les conditions d'environnement, ce qui nécessite des expérimentations multi-locales pendant plusieurs années. Ces caractéristiques originales conditionnent directement la sélection de cette espèce.

La recherche de résistances aux maladies et aux ravageurs et l'adaptation aux modes d'utilisation sont les leitmotivs de toute l'histoire de la sélection de la pomme de terre. L'étude de la physiologie de la croissance et du développement de la plante et du tubercule a constitué un important volet, particulièrement en France et aux Pays-Bas, en raison de leurs conséquences agronomiques et alimentaires. L'INRA a arrêté la création variétale au début des années 1990 pour se concentrer sur la création de géniteurs contenant des résistances aux maladies.

Le renouvellement des variétés est lent, mais régulier, grâce à l'activité de nombreux sélectionneurs privés, en général coopératives ou moyennes entreprises, plutôt que groupes semenciers internationaux. Contrairement au reste du monde, les sélectionneurs de l'Europe de l'Ouest s'intéressent autant aux critères qualitatifs de présentation et à la qualité culinaire qu'au rendement brut. La recherche publique consacrée à la pomme de terre reste importante dans le monde, considérant de plus en plus cette espèce comme un modèle, notamment en biotechnologie.

Caractères importants améliorés

Rendement. Il résulte du nombre de tiges et de tubercules, du grossissement journalier des tubercules et de la durée de ce grossissement. Outre le progrès génétique, deux éléments ont contribué principalement à l'augmentation du rendement : la maîtrise des techniques de conservation permettant de limiter les pertes en cours de stockage (environ 5 % en France actuellement) et la phyto-technie, avec la fertilisation, l'irrigation, la protection de cultures et l'utilisation de plants certifiés (plus de 70 % en France). Le rendement a beaucoup augmenté passant, en France, de 14 t/ha en 1950 à 45 t/ha en 2004.

Adaptation au milieu. C'est un critère très important, difficile à sélectionner en particulier pour l'obtention de variétés destinées à l'exportation de plants vers les régions méditerranéennes et tropicales : il est en effet déterminant pour obtenir un niveau de rendement suffisant. L'adaptation est la résultante de nombreux caractères physiologiques à déterminisme génétique complexe (durée de dormance, réaction photopériodique, ...). Son étude demande un jugement global qui nécessite des essais multilocaux et pluriannuels. De nombreuses variétés répondent actuellement à ces caractéristiques, ce qui a permis de pénétrer de nouveaux marchés.

Résistance aux bio-agresseurs. Différents types de résistance ont été introduits pour contrecarrer les très nombreux bio-agresseurs qui attaquent la pomme de terre. La plupart viennent d'espèces sauvages apparentées et ont été introduits par croisements interspécifiques. C'est le cas des résistances par hypersensibilité au virus A (*Potato virus A*, PVA), au virus S (*Potato virus S*, PVS), au virus X (*Potato virus X*, PVX), au virus Y (*Potato virus Y*, PVY), de l'hypersensibilité au nématode doré à kyste (*Globodera rostochiensis* Ro 1-4), au mildiou (*Phytophthora infestans*), à la galle commune (transmise par une bactérie *Streptomyces scabies*) et à la galle verruqueuse (transmise par un champignon *Synchytrium endobioticum*), ou bien des résistances extrêmes par immunité au virus X et au virus Y. Pour obtenir des formes durables de résistance, en particulier vis-à-vis du mildiou, un des objectifs est le cumul de résistances oligogéniques et de résistances partielles, généralement polygéniques.

Il faut signaler aussi l'importance de la sélection sanitaire dans la maîtrise des problèmes liés aux maladies à virus et aux bactérioses. En France, en l'espace de deux ou trois décennies, certains virus autrefois omniprésents comme le virus S ou le virus M (*Potato virus M*, PVM), ont quasiment disparu. Ce n'est toutefois pas le cas dans tous les pays, notamment en Europe continentale.

Précocité. Dans les zones où le climat est suffisamment favorable, on plante tôt et on récolte tôt des variétés à cycle court, productives dans ces conditions. Il s'agit de pommes de terre de primeur. Pour répondre à ces objectifs, il a fallu sélectionner des génotypes capables non seulement de former précocement leurs tubercules, mais aussi d'atteindre un rendement économiquement acceptable tôt en saison. Ce type de culture est conduit dans les régions à climat doux, ce qui permet de planter en hiver et de récolter au printemps. C'est pour la pomme de terre de primeur que la sélection créatrice a été la plus active, dans les années 1970 et 1980.

Qualité

Présentation du tubercule. Elle a fait de gros progrès (forme régulière, peau lisse, couleur de la chair, absence de germes profonds), répondant ainsi à la demande du consommateur. La couleur de la chair est un critère dont l'appréciation varie selon les pays.

Qualité culinaire de la pomme de terre. La teneur en matière sèche du tubercule, responsable en partie de la teneur à la cuisson ainsi que le degré de noircissement après la cuisson sont des caractères qui ont été très améliorés par la sélection.

Qualité industrielle. La transformation industrielle de la pomme de terre en produits frits (frites et chips) demande, outre des caractéristiques de forme et de calibre du tubercule, une teneur assez élevée en matière sèche et une teneur très faible à nulle en sucres réducteurs (glucose et fructose), ceux-ci intervenant avec les acides aminés dans la réaction de Maillard dont le résultat est un brunissement des produits frits, les rendant impropres à la consommation.

Teneur en alcaloïdes. La pomme de terre contient des glycoalcaloïdes (surtout de la solanine et de la chaconine) qui peuvent être toxiques pour l'homme. Outre les germes et les fruits, leur principal site d'accumulation est l'épiderme des tubercules. Comme ils sont thermolabiles, la consommation de tubercules pelés et cuits met donc peu en danger la vie humaine. Néanmoins, une teneur de 200 ppm est généralement considérée comme une limite à ne pas dépasser. L'élaboration d'un référentiel dans les conditions françaises de culture a montré qu'il existe une assez forte variabilité variétale pour ce caractère et l'on observe aussi des interactions variété × année et des interactions variété × itinéraire technique sur son expression. La plupart des valeurs trouvées étaient inférieures à la teneur limite supérieure indiquée. Toutefois, certaines variétés féculières récentes présentent des teneurs parfois élevées en alcaloïdes qui peuvent être dues à l'utilisation de *Solanum vernei* Bitter & Wittm., espèce riche en glycoalcaloïdes, comme source de la résistance au nématode à kyste (*Globodera pallida* Pa 2-3) qu'elles contiennent.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ

Exploitation des mutations spontanées	OUI Des mutations spontanées sont utilisées : – la couleur de la peau, – la précocité.
Mutagenèse induite	AUCUNE en France (sauf pour travaux scientifiques) OUI à l'étranger 4 variétés issues de mutagenèse ont été recensées par la FAO/IAEA. La mutagenèse a été utilisée avec succès pour modifier la couleur de la peau ('Desital', 'Konkei No'), pour améliorer le rendement ('Mariline 2') et pour introduire la tardiveté ('Sarme').
Croisements interspécifiques	OUI Dès le début du XX ^e siècle, avec <i>S. demissum</i> Lindl. pour introduire la résistance au mildiou. La quasi-totalité des variétés actuellement inscrites au catalogue européen ont des espèces apparentées dans leur ascendance, en particulier <i>S. andigenum</i> Juz. & Buk., <i>S. demissum</i> , <i>S. vernei</i> et <i>S. stoloniferum</i> Schldtl. & Bouché.

suite...

... suite

Hybridation somatique	ESSAIS Les « pomates », hybrides somatiques entre la pomme de terre et la tomate, d'intérêt académique uniquement, réalisées dans les années 1970. Des hybrides somatiques avec <i>S. brevidens</i> Phill. apportent la résistance au virus de l'enroulement foliaire de la pomme de terre (<i>Potato leafroll virus</i>, PLRV). La résistance aux pourritures molles (causées par <i>Pectobacterium carotovorum</i>, anciennement <i>Erwinia carotovora</i>) a été introduite par hybridation somatique avec <i>S. brevidens</i>. L'exploitation de l'hybridation somatique avec <i>S. bulbocastanum</i> Dunal., espèce sauvage résistante à toutes les races de mildiou, est en cours.
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE La pomme de terre cultivée est tétraploïde (de type allotétrasomique segmentaire). Cependant, l'hybridation interspécifique exploite plusieurs niveaux de ploïdie (2x, 4x, 6x).
Transgénèse	OUI 1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce dans les années 1980. Caractères travaillés et essais au champ. Le domaine de la résistance à l'herbicide glyphosate, aux maladies (virus X et Y, mildiou, bactéries : <i>Pectobacterium</i> et <i>Ralstonia</i>) et celui de la résistance aux insectes (teigne et doryphore) ont été explorés. Des travaux de transgénèse portent également sur des modifications qualitatives et quantitatives de la teneur en féculé (pomme de terre sans amylose ((<i>amylose free</i>) ou sans alcaloïde (<i>alcaloid free</i>)) et en sucres réducteurs. Essais au champ de pomme de terre transgénique. La pomme de terre a fait l'objet de nombreux essais au champ. Ainsi, aux États-Unis, plus de 500 essais au champ avaient déjà été réalisés en 2000. En France, des essais concernant une meilleure valorisation de l'azote (gène de la nitrate réductase), une résistance au virus Y (gène de la protéine capsidique du virus Y ou de celle du virus de la mosaïque de la laitue), une résistance au mildiou, une résistance à la teigne (gène <i>Bt</i>) ainsi que l'absence d'amylose ont été effectués entre 1990 et 2002 (cf. encadré p. 616).

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Le tubercule est l'organe de multiplication végétative de la pomme de terre en conditions agricoles. Le taux de multiplication est de l'ordre de 10. La multiplication végétative <i>in vitro</i> (microbouturage et microtubérisation) est appliquée aux premières générations de multiplication des variétés et pour la conservation des clones dans les banques de gènes. En France, elle est employée systématiquement depuis 1976. La cryoconservation est appliquée à la conservation des ressources génétiques : elle est pratiquée sur des méristèmes apicaux, avec ou sans enrobage dans des billes d'alginate.

suite...

... *suite*

Sélection sanitaire

OUI

L'association de la thermothérapie et de la culture de méristèmes *in vitro* a permis de « régénérer » la plupart des variétés autrefois infectées chroniquement par des virus en France.
La sélection sanitaire est pratiquée à tous les stades du schéma du système officiel de production de plants certifiés.

Haploïdisation

OUI

La pollinisation par certains clones de *S. phureja* induit le développement d'embryons dihaploïdes issus de parthénogenèse *in situ*. Les nombreuses plantes dihaploïdes ainsi obtenues sont peu fertiles et peu vigoureuses. Leur croisement avec des espèces apparentées de *Solanum* conduit à des populations diploïdes utilisées en sélection.
La culture d'anthères *in vitro* permet d'obtenir également des plantes dihaploïdes et la culture d'anthères de plantes dihaploïdes conduit à des plantes monohaploïdes.

Recours à la stérilité mâle

OUI

Deux tiers des variétés sont mâles stériles. Il s'agit, selon les cas, d'une stérilité nucléo-cytoplasmique ou d'une stérilité nucléaire.

Recours à l'auto-incompatibilité

NON

Solanum tuberosum est une espèce autocompatible.

Marquage moléculaire

OUI

Des cartes génétiques existent.
Les marqueurs (RFLP, AFLP, SSR, ISSR) permettent l'identification des variétés.
Des gènes ont été clonés : notamment le gène *RI* de résistance au mildiou, le gène majeur *Rblb* de *S. bulbocastanum* encore non contourné et le gène *H1* de résistance au nématode à kyste *Globodera pallida*.

ESSAIS

L'utilisation de la sélection assistée par marqueurs est à l'étude. De nombreux travaux ont été réalisés depuis 10 ans, mais avec peu d'applications à ce jour (une seule citée : la résistance au virus Y).

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection

Sélection récurrente sur les descendances de croisements entre géniteurs.
Sélection au niveau diploïde : obtention de plantes dihaploïdes, croisements interspécifiques avec espèces apparentées, création de populations diploïdes et retour à l'état tétraploïde par polyploïdisation mitotique, méiotique (ou somatique).

Types variétaux

Variété clone

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation dans au moins un pays

Résistance au doryphore (*Leptinotarsa decemlineata*). Aux États-Unis, le doryphore est sans doute l'insecte qui cause le plus de dégâts aux cultures de pomme de terre. Il est susceptible de dévorer le feuillage, ce qui conduit à des baisses de rendement très importantes. Le gène *Cry3A*, provenant de *Bacillus thuringiensis*, code une delta-endotoxine, qui agit comme insecticide, spécifiquement sur les lépidoptères. Cette protéine peut se fixer sur des récepteurs spécifiques présents sur l'épithélium de l'intestin de ces insectes. Les protéines fixées forment ensuite des canaux cationiques qui perturbent complètement le fonctionnement de l'intestin. Ces dysfonctionnements conduisent à la paralysie, puis à la mort de l'insecte. Ces endotoxines sont inoffensives pour les mammifères car ceux-ci ne possèdent pas de récepteurs. L'innocuité de cette protéine a été vérifiée en nourrissant des mammifères et des oiseaux en laboratoire avec des aliments contenant un supplément en protéine de *Bacillus thuringiensis*. Le taux de solanine et celui de chaconine (glycoalcaloïdes) ne sont pas plus élevés dans les lignées transgéniques que dans les lignées non transgéniques.

Résistance à la teigne (*Phthorimaea operculella*). La teigne est un autre insecte lépidoptère dont les dégâts sont observés essentiellement sur le tubercule pendant le stockage et qui le rend impropre à toute consommation. Le gène *CryIAb* synthétise une protéine toxique spécifique agissant au niveau des parois de l'intestin de l'insecte. Les tubercules de plantes transgéniques sont totalement résistants, mais on constate de nombreux effets secondaires : suppression de la floraison, morphologie de la plante et du tubercule affectée, sensibilité accrue au mildiou. Il est donc nécessaire d'effectuer une sélection pour retenir les clones les plus proches de la variété de départ.

Résistance au lutéovirus de l'enroulement foliaire de la pomme de terre (PLRV). Le PLRV, qui est responsable d'une maladie grave causant de grandes pertes économiques, est un virus transmis par le puceron *Myzus persicae*. L'introduction du gène *Rep* (codant l'ARN polymérase dépendante de l'ARN du PLRV) et du gène *Hel* (codant l'hélicase du PLRV) dans des plantes par transformation génétique conduit à l'obtention de plantes résistantes au PLRV grâce à un phénomène impliquant un blocage de la traduction de l'ARN viral, encore très mal compris.

Résistance au virus Y de la pomme de terre. Ce virus, le plus souvent transmis par un puceron, *Myzus persicae*, est susceptible d'occasionner des baisses de rendement pouvant aller jusqu'à 80 %. Le gène *CP*, codant pour la protéine de la capsid du virus Y (PVY CP) est transféré dans des plantes de pomme de terre. Par un mécanisme encore mal connu, les plantes transgéniques obtenues acquièrent une résistance au PVY. La protéine PVY CP n'a aucune homologie avec des protéines allergènes ou toxiques connues. Les clones n'exprimant pas la protéine se révèlent résistants au PVY, ce qui peut s'expliquer par un phénomène de non-expression des gènes (*gene silencing*).

Perspectives d'amélioration

Après une période de diminution des superficies consacrées à la culture de la pomme de terre, celles-ci paraissent se stabiliser dans la plupart des régions à climat tempéré. Le potentiel d'accroissement dans les régions tropicales est à raisonner en fonction des facteurs climatiques limitants (température élevée, manque d'eau) et de la place que l'on veut donner à la pomme de terre dans l'alimentation locale : nourriture de base, élément de diversification du régime alimentaire ou production spéculative destinée à une clientèle aisée). Dans les

pays européens, on peut s'attendre à une augmentation de la transformation en frites, en même temps qu'à une exigence accrue des consommateurs en termes de présentation du produit et de qualité culinaire.

D'ores et déjà, la démarche de production raisonnée est bien avancée et fait l'objet de cahiers des charges. De plus, il faudra tenir compte de nouvelles réglementations : interdiction d'un grand nombre de molécules actuellement utilisées en protection phytosanitaire, obligation de réduire de manière drastique les quantités de pesticides, conséquences de la loi sur l'eau. La géographie de la production peut changer : en France, des départements comme la Marne et l'Eure-et-Loir accroissent leurs superficies ; l'élargissement de l'Union européenne peut aussi contribuer à cette modification, surtout en ce qui concerne les cultures destinées à la production de fécule. On peut donc s'attendre à ce que les recherches sur la résistance aux bio-agresseurs et sur la tolérance aux stress abiotiques s'intensifient, ce deuxième point s'inscrivant dans la perception des changements climatiques globaux.

Un phénotypage précis de certains de ces caractères nécessite encore leur décomposition en composantes plus élémentaires et la mise au point de tests, avec la collaboration indispensable de pathologistes, de bioclimatologistes et d'agronomes. Le progrès génétique pour ces caractères passe par une exploitation accrue des ressources génétiques.

Un travail de méthodologie d'évaluation des critères de qualité, basé sur la définition des caractéristiques physiques et biochimiques mesurables est également nécessaire. Une sélection pour des caractères de qualité chez les variétés féculières (viscosité, etc.) permettrait de garder à la fécule de pomme de terre sa compétitivité vis-à-vis des amidons de blé (*Triticum aestivum* (L.) Thell.) ou de maïs (*Zea mays* L. subsp. *mays*).

Il est probable que les recherches se poursuivront dans les pays conduisant déjà des programmes importants : Europe de l'Ouest, Pologne, Hongrie, Russie, Chine, Amérique du Nord et certains pays d'Amérique latine (Argentine, Chili, etc.), avec des moyens, variables selon les pays, consacrés à la génomique.

Caractères à améliorer

Résistance aux bio-agresseurs. La recherche de résistances pour les nombreux bio-agresseurs de la pomme de terre est primordiale, notamment dans un souci de préservation de l'environnement. En effet, même si les superficies cultivées en pomme de terre sont inférieures à celles d'autres grandes cultures, le nombre de traitements qu'elles reçoivent, en particulier dans la lutte contre le mildiou, est élevé. Les stratégies de construction des résistances peuvent différer en fonction des bio-agresseurs. Des résistances mono- ou oligogéniques peuvent rester efficaces et durables vis-à-vis de ravageurs à dispersion restreinte et se multipliant peu, comme les nématodes à kystes. En revanche, dans le cas d'autres parasites ou ravageurs ces résistances s'avèrent efficaces mais d'une durabilité très limitée. Des résistances partielles

sous la dépendance de plusieurs gènes continueront donc de faire l'objet de recherches, le cumul des deux types de résistance n'étant néanmoins pas superflu.

Qualité. L'aptitude à la qualité culinaire, l'adaptation à la friture ainsi que l'aptitude à la conservation à basse température sont encore à améliorer.

Tolérance aux stress abiotiques. La pomme de terre est une espèce qui a un besoin d'eau important. Compte tenu des évolutions climatiques, la tolérance aux stress abiotiques devra de plus en plus être considérée comme un critère de sélection.

Techniques à développer

Il est intéressant de réaliser une sélection mixte en combinant la sélection familiale (sur descendance) dans les stades précoces de la sélection (c'est-à-dire dans les 3 à 4 premières années après les croisements) pour estimer la valeur en descendance des géniteurs, avec une sélection clonale (sur individus) dans les stades ultérieurs (dans les 4 à 6 années suivantes) au cours desquels la valeur propre est évaluée. Cette démarche est utilisée pour la création de géniteurs et connaît un début d'application en sélection variétale, notamment pour les variétés dont les performances dépendent d'un petit nombre de caractères clés (par exemple, les variétés à vocation industrielle pour la fécule ou les produits frits, etc.).

La poursuite des travaux utilisant l'hybridation interspécifique (avec le recours éventuel au sauvetage d'embryons) apportera sans doute encore beaucoup de progrès dans l'amélioration de la pomme de terre, en particulier pour la création de variétés résistantes aux multiples bio-agresseurs de cette espèce.

La cartographie de certains gènes majeurs de résistance aux parasites est disponible et doit être étendue à d'autres gènes. La recherche de locus à effet quantitatif (QTL) doit être développée pour promouvoir la sélection assistée par marqueurs. Il s'agit notamment de gérer durablement la variabilité des déterminants génétiques de la résistance. Les travaux actuels de biologie moléculaire visant la sélection assistée par marqueurs sont principalement réalisés sur un matériel diploïde. Des cartes ont été développées depuis plus de 10 ans avec quelque 500 marqueurs pour la pomme de terre et la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), répartis sur l'ensemble du génome. Une carte ultradense a été constituée à l'aide de milliers de marqueurs AFLP.

Les marqueurs moléculaires (AFLP, SSR, SNP, etc.) sont déjà utilisés pour l'identification variétale au niveau tétraploïde. Une utilisation de ces marqueurs associés aux critères DHS et aux caractères agronomiques est, par contre, encore totalement à prospecter pour la gestion des ressources génétiques et celle des plans de croisements des sélectionneurs.

Inscription et protection des variétés en France

1935, ouverture du catalogue officiel pomme de terre.

1961, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste B des variétés de pomme de terre.

1962, classement, par arrêté ministériel, suivant leur mode d'utilisation, des variétés de pomme de terre inscrites au catalogue.

En 2003, 184 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 1008 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Dans les épreuves de DHS, 50 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de ces 2 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères requis de valeur agronomique et technologique (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par les variétés les plus multipliées. Ces témoins sont régulièrement actualisés. Les résultats des variétés inscrites sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Il faut signaler la part du COV pour la protection de variétés de cette espèce à multiplication végétative : 61 % des surfaces cultivées en Europe, actuellement, sont plantées avec des variétés protégées par COV.

La production, le contrôle et la certification des plants sont définis par des règlements techniques officiels. La certification garantit l'état sanitaire, l'état physiologique et l'identité variétale des plants. Le nombre de variétés multipliées en France, chaque année, en vue d'une production de plants certifiés, est environ de 140 et le pourcentage de plants certifiés dans la production française est d'environ 70 %.

La mise en place de la certification des plants a été décisive dans l'augmentation du rendement, observée ces dernières décennies. Elle est déterminante pour la qualité des plants dans des phases initiales de multiplication, dans le maintien de l'état sanitaire sur le territoire français et dans celui de la qualité des produits commercialisés.

Pour en savoir plus

Andriveau D., Chauvin J.-E. et Ellissèche D., 2004. Résistance au mildiou : nouveaux gènes, anciens problèmes? *Pomme Terre fr.*, 543, 58-59.

- Austin S., Baer M. et Helgeson J.P.**, 1985. Transfer of resistance to tomato leafroll virus from *Solanum brevidens* into *Solanum tuberosum* by somatic fusion. *Plant Sci.*, 39, 75-82.
- Bourget D.**, 1999. *Le grand livre des variétés de pomme de terre*. Éditions Ad Hoc, Paris, 160 p.
- Caromel B., Rousselle-Bourgeois F., Lefebvre V. et Mugniéry D.**, 1999. Molecular linkage mapping of a diploid progeny between *Solanum tuberosum* et *S. spengazzinii*. 14th triennial conference of the European Association for Potato Research. EAPR99, Sorenzo, Italy, 724-725.
- Ellissèche D.**, 1999. La pomme de terre. Dans : *Technologie des légumes*. Y. Tirilly et C.M. Bourgeois, éd., Tec & Doc, Paris, 65-91.
- Gebhardt C., Mugniéry D., Ritter E., Salamini F. et Bonnel E.**, 1993. Identification of RFLP markers closely linked to the *H1* gene conferring resistance to *Globodera rostochiensis* in potato. *Theor. Appl. Genet.*, 78, 65-75.
- Hoekema A., Huisman M.J., Molendijk L., Van den Elzen P.J.M. et Cornelissen B.J.C.**, 1989. The genetic engineering of two commercial potato cultivars for resistance to potato virus X. *Biotechnology*, 7 (3), 273-278.
- Hougas R.W., Peloquin S.J. et Ross R.W.**, 1958. Haploids of the common potato. *J. Hered.*, 49, 103-106.
- Jacobsen E. et Rousselle P.**, 1993. La pomme de terre. Dans : *Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence*. Éditions OCDE, Paris, 207-222.
- Jansky S.**, 2000. Breeding for disease resistance in potato. *Plant Breed. Rev.*, 19 (4), 69-155.
- Madec P. et Pérennec P.**, 1962. Les relations entre l'induction de la tubérisation et la croissance chez la plante de pomme de terre (*Solanum tuberosum*). *Ann. Physiol. vég.*, 4, 5-84.
- Moisan-Thiéry M.**, 2001. Par leur profil génétique, identification des variétés. *Pomme Terre fr.*, 527, 20-22.
- Mok D.W.S. et Peloquin S.J.**, 1975. Three mechanisms of 2n pollen formation in diploid potatoes. *Can. J. Genet. Cytol.*, 17, 217-225.
- Morel G. et Martin C.**, 1955. Guérison de pommes de terre atteintes de maladie à virus. *C. R. Acad. Agric.*, 41, 472-474.
- Moule C.**, 1972. Pomme de terre. Dans : *Plantes sarclées et diverses*. La Maison rustique, Paris, tome 3, 144-196.
- Nozeran R. et Bancelhon L.**, 1972. Les cultures *in vitro* en tant que technique pour l'approche de problèmes posés par l'amélioration des plantes. *Ann. Amélior. Plant.*, 22, 167-185.
- Ortiz R.**, 1998. Potato breeding via ploidy manipulations. *Plant Breed. Rev.*, 16 (2), 15-86.
- Pérennec P. et Madec P.**, 1980. Âge physiologique du plant de pomme de terre. Incidence sur la germination et répercussion sur le comportement des plantes. *Potato Res.*, 32, 183-199.
- Roush R.T.**, 1994. Managing pests and their resistance to *Bacillus thuringiensis* : can transgenic crops be better than sprays? *Biocontrol Sci. Technol.*, 4 (4), 501-506.
- Rousselle P., Robert Y. et Crosnier J.-C.**, 1996. *La pomme de terre*, INRA Éditions, Paris, 607 p.
- Rousselle P., Rousselle-Bourgeois F. et Ellissèche D.**, 1992. La pomme de terre. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 243-263.
- Rousselle-Bourgeois F. et Spire D.**, 2003. Pommes de terre. Dans : *Histoires de légumes. Des origines à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 160-177.
- Schall G.P., Safford R., Westcott R.J., Tayal A., Shi Y.C., Gidley M.J. et Jobling S.A.**, 2000. Production of very-high-amylose potato starch by inhibition of SBE A and B. *Nat. Biotechnol.*, 18 (5), 551-554.
- Song J., Bradeen J.M., Naess S.K., Raasch J.A., Wielgus S.M., Haberlach G.T., Liu J., Kuang H., Austin-Phillips S., Buell C.R., Helgeson J.P. et Jiang J.**, 2003. Gene *RB* cloned from *Solanum bulbocastanum* confers broad spectrum resistance to potato late blight. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100 (16), 9128-9133.

Le pommier et ses porte-greffe

Malus domestica (Borkh.) Borkh. ($2n = 2x = 34$)
(Rosacées)

Présentation de l'espèce

La sous-famille des Maloïdées ($x = 17$) est probablement issue d'une allopolyploïdisation, antérieure au Crétacé, entre des espèces de la sous-famille des Prunoïdées ($x = 8$) et des espèces de celle des Spiraeoïdées ($x = 9$). Les pommiers sauvages (*Malus sylvestris* P. Mill.) sont présents dans toute l'Eurasie. Des vestiges de pommes sauvages ont été trouvés en Europe dans des villages lacustres néolithiques de Suisse et d'Italie du Nord. Les pommiers cultivés actuels dériveraient pour partie de *M. sieversii* Ledeb. Roem., d'Asie centrale, et les premières variétés multipliées par greffage seraient arrivées dans le Caucase, puis en Europe. De nombreuses variétés de pommier ont été décrites par les Grecs et les Romains et ceux-ci ont contribué à en diffuser la culture en Europe. À chaque étape, les pommiers sauvages ont pu contribuer par introgression à élargir la diversité génétique. L'amélioration du pommier par croisements contrôlés n'a commencé qu'avec le grand hybrideur anglais T.A. Knight à la fin du XVIII^e siècle. Le pommier domestiqué a pendant longtemps été appelé *Malus pumila* P. Mill. Cependant, étant donné que les variétés actuelles de pommier cultivé sont les produits de très nombreux croisements interspécifiques (*M. sylvestris*, *M. baccata* (L.) Borkh., *M. sieversii*, *M. dasycphylla* Borkh., etc.), le pommier cultivé est désigné par certains auteurs *Malus* × *domestica*. Cette dénomination est toutefois soumise à controverse et l'appellation *Malus domestica* (Borkh.) Borkh. est celle retenue pour le pommier cultivé. Des analyses d'ADN chloroplastique et des ADN ribosomiques, ont montré que le pommier cultivé était très proche de certains pommiers sauvages.

Le pommier est une espèce allogame pérenne, multipliée végétativement par greffage. La plupart des espèces de *Malus* Mill. peuvent s'intercroiser (*Malus floribunda* Sieb. ex Van Houtte, *M. zumi* (Matsumura) Rehd., etc.). Les pommiers cultivés peuvent polliniser certaines espèces sauvages telles que *M. sylvestris*.

La diversité est importante chez le pommier puisque 6 000 variétés étaient déjà répertoriées en 1971. Depuis, un certain nombre de croisements ont permis d'accroître cette diversité. L'essentiel des ressources génétiques est conservé, sur le plan national, au sein d'un réseau de conservatoires animé par l'INRA. Ainsi, à Angers (Maine-et-Loire), l'INRA gère une collection de plus de 1 500 clones et de nombreuses associations d'amateurs passionnés, conservent un grand nombre de variétés locales et anciennes.

Production et utilisation

Le produit récolté, la pomme, est un fruit charnu d'un type particulier, dit « pomacé », dont la partie comestible dérive surtout des tissus du réceptacle entourant l'ovaire infère, et dont les graines ou pépins sont entourés d'une enveloppe parcheminée.

La pomme est un des fruits les plus consommés dans le monde. La production mondiale est de 62 millions de tonnes dont 22 millions en Chine. La France est le 6^e producteur avec plus de 2,2 millions de tonnes après la Chine, les États-Unis (4,5 millions de tonnes) et la Pologne (2,5 millions de tonnes), l'Iran (2,4 millions de tonnes) et la Turquie (2,3 millions de tonnes) (données FAO, 2004).

La pomme est :

- soit un fruit de table principalement consommé frais. Des progrès considérables dans les conditions de stockage permettent de proposer ce fruit en toute saison. Enfin, depuis peu, elle est aussi proposée sous forme de chips ;
- soit un fruit transformé par l'industrie de manière à produire jus, concentré, compote, cidre et calvados. La production de pomme à cidre a beaucoup chuté dans les dernières décennies, passant de 2 millions de tonnes en 1968 à 650 000 tonnes en 1990. Depuis 1980, pour endiguer cette évolution et éviter des risques de pénuries, des vergers avec un système de conduite intensif, en basse tige (c'est-à-dire dont les premières branches charpentières sont à 0,5 m du sol), ont été plantés sous l'impulsion des industriels proposant des contrats de plantation. En 1993, le verger haute tige (c'est-à-dire dont les premières branches charpentières sont à 2 m du sol), qui est la forme traditionnelle, produisait 449 000 tonnes et le verger basse tige 70 000 tonnes. En 2002, ces chiffres étaient respectivement de 380 000 tonnes et 225 000 tonnes, soit au total, 605 000 tonnes. La régression du verger haute tige est donc aujourd'hui largement compensée par l'essor du verger basse tige.

Enfin, il existe des pommiers d'ornement, dont les fruits ne sont pas consommés.

Histoire des variétés cultivées en France

Plusieurs variétés de pommier actuellement cultivées telles que 'Golden Delicious' et 'Granny Smith' sont des variétés anciennes datant du XIX^e siècle et

issues de semis de hasard. Depuis 1980, on assiste au développement de nouvelles variétés issues de programmes d'amélioration telles que 'Gala' et ses mutants, ainsi que plus récemment, à l'implantation de la variété d'origine australienne 'Pink Lady'. Les dates mentionnées ici sont les dates d'inscription, la plupart des variétés décrites ayant été découvertes bien antérieurement. On distingue deux catégories : les variétés dites d'amateurs destinées aux jardins familiaux et les variétés commerciales destinées à la filière fruitière commerciale. Les variétés de pommier destinées à la production de cidre sont spécifiques.

Variétés de pommier à fruit de table

Variétés dites d'amateurs

Il en existe un très grand nombre, parmi lesquelles on peut citer :

Fin du XVIII^e siècle, '**Grand Alexandre**', variété introduite de Moscou (Russie). Cette variété précoce produit un fruit surtout recherché pour son calibre et sa coloration (striée de carmin sur fond verdâtre) qui résiste bien au transport. Cette variété autrefois cultivée pour le commerce est uniquement cultivée actuellement par les jardiniers amateurs.

'**Pay bou**', '**Astrakan rouge**', '**Borowinka**', etc., autres variétés précoces.

'**Calville blanc**', variété très ancienne (XVII^e siècle) d'origine inconnue. Son fruit de couleur jaune paille est de maturité semi-tardive et d'une qualité gustative exceptionnelle, mais aussi d'une grande fragilité au transport en raison de ses côtes saillantes. Cette variété, autrefois cultivée pour le commerce de luxe, est très sensible à la tavelure et uniquement cultivée actuellement par les jardiniers amateurs.

'**Belle de Pontoise**', '**Reinette Clochard**', '**Reinette de Saintonge**', etc., autres variétés de saison semi-tardives.

'**Api rose**' ou '**Pomme d'Api**', variété très ancienne, déjà connue chez les Romains et venant de Grèce : Claudius Appius (III^e-IV^e siècle av. J.-C.) l'aurait rapporté du Péloponnèse. Son fruit, de petit calibre et coloré en carmin après insolation, a une maturité tardive. Il était encore cultivé pour la commercialisation au début du XX^e siècle.

'**Reinette de Caux**', '**Court pendu plat**', '**De l'Estre**', etc., autres variétés tardives.

Ces variétés dites d'amateurs sont généralement des variétés « locales », adaptées à un terroir. C'est ainsi que l'on peut citer dans l'ouest de la France, '**Reinette Grand-mère**' et '**Reinette d'Armorique**', dans le centre '**Belle Fille de l'Indre**', dans le sud-est '**Pomme de Risoul**' et dans le nord '**Colapuis**' et '**Cabarette**'.

Variétés commerciales

Fin du XVIII^e siècle, '**Reine des Reinettes**', variété très ancienne d'origine française ou néerlandaise. Cette variété précoce, à fruit jaune d'or strié de rouge

orangé, produit un fruit à chair ferme, d'excellente qualité gustative. Elle est moyennement sensible à l'oïdium, à la tavelure et au feu bactérien ainsi qu'au puceron lanigère. Malgré les difficultés techniques que présente la production, c'est l'une des variétés anciennes les plus cultivées, très demandée par les consommateurs.

1856, '**Belle de Boskoop**' (K.H.W. Ottolander, Pays-Bas), variété triploïde importante en Europe du Nord, malgré sa sensibilité aux gelées printanières. Son fruit de couleur verdâtre est gros, de bonne qualité et supporte bien le transport.

À partir de 1961, il s'agit de la date d'inscription.

1961, '**Golden Delicious**' (A.H. Mullins, États-Unis), variété nord-américaine se caractérisant par sa productivité, sa régularité de production et par un beau fruit de qualité neutre. Cette variété de saison résulte d'un semis de hasard découvert par A.H. Mullins dans le Clay County (Virginie occidentale, États-Unis) en 1880. Elle a été introduite par les pépinières Stark Bros en 1914. C'est la variété la plus cultivée dans le monde.

1968, '**Granny Smith**' (Mme T. Smith, Australie, 1868), variété australienne très tardive se caractérisant par un beau fruit de couleur verte à acidité marquée. Elle résulte d'un semis de hasard.

1976, '**Belrène**' (INRA, France), variété issue de la mutagenèse au MSE de la variété 'Reine des reinettes' et se caractérisant par un fruit à épiderme rouge lavé.

1977, '**Campsur**' (F. Campbell, Washington, États-Unis), l'un des nombreux mutants de la variété 'Delicious', découverts au cours du XX^e siècle se caractérisant par sa productivité, sa régularité de production et par un beau fruit de qualité neutre, plutôt douce. La variété présente un fruit rouge foncé. Cette variété est commercialisée sous la marque Red Chief®.

1977, '**Chantecler**' (INRA, France), variété de niche (28 000 tonnes en 2005) issue de l'hybridation entre 'Golden Delicious' et 'Reinette Clochard'. C'est une variété possédant une productivité régulière et d'excellente qualité gustative. La pomme est de couleur jaune d'or. Cette variété est commercialisée sous la marque Belchard®.

1977, '**Florina**' (INRA, France), variété obtenue par croisements interspécifiques. C'est une des toutes premières variétés se caractérisant par une résistance à la tavelure (gène *Vf*) et une faible sensibilité au feu bactérien. Elle possède aussi une tolérance remarquable au puceron cendré qui semble être contrôlée par deux locus. Cette variété est commercialisée sous la marque Querina®.

1982, '**Gala**' (Kidd, Nouvelle-Zélande), variété néo-zélandaise, issue d'un croisement contrôlé, se caractérisant par sa capacité à être cultivée dans une aire très large et un fruit bicolore à faible acidité et à texture ferme. De nombreux mutants issus de cette variété sont cultivés.

1982, **'Jonagold'** (Station de Geneva, États-Unis), variété triploïde nord-américaine, issue d'un croisement contrôlé entre 'Golden Delicious' et 'Jonathan', adaptée au nord de l'Europe et nécessitant peu d'éclaircissage. Le fruit est gros et aromatique.

1983, **'Delgollune'** (Delbard Georges, France), variété diploïde issue du croisement entre 'Golden Delicious' et 'Lundybitrop'. Elle fait partie des toutes premières variétés à fruit bicolore cultivées en France. Son fruit, de très bonne qualité, a une chair croquante et parfumée. Cette variété est commercialisée sous la marque Delbardjubile®.

1988, **'Bauline'** (INRA, France), variété issue de la mutagenèse aux rayons γ de la variété 'Melrose' se caractérisant par une meilleure productivité que celle-ci.

1992, **'Braeburn'**, (Nouvelle-Zélande), variété néo-zélandaise issue d'un semis de hasard en 1952, de production régulière et remarquable pour son fruit à maturité tardive et de longue conservation.

1993, **'Delblush'** (Delbard Georges, France), variété issue d'un croisement entre 'Golden Delicious' et 'Grifer'. L'épiderme du fruit est très attractif, de couleur jaune doré ; la maturité de récolte se situe un peu après celle de 'Golden Delicious' ; la qualité gustative du fruit est unanimement reconnue : fruit très ferme, juteux, sucré et assez acidulé. Cette variété est commercialisée sous la marque Tentation®. Le développement de cette variété se fait depuis 1996 dans le cadre du Club Tentation® qui règle les cahiers des charges de production au verger et de commercialisation. Cette variété ne présente pas de résistance particulière aux bio-agresseurs ; elle représente d'ores et déjà un succès commercial.

2003, **'Ariane'** (INRA, France), variété issue d'un croisement, qui fait partie de la gamme Les Naturianes®, développée par NOVADI. Elle contient les gènes de résistance à la tavelure Vf et Vg. Elle est peu sensible à l'oïdium et au feu bactérien. De maturité tardive, d'excellente qualité gustative et de très bonne conservation, elle fait l'objet d'une procédure de lancement commercial tout à fait nouvelle par l'intermédiaire de la structure POMALIA qui regroupe plusieurs acteurs de la filière (pépiniéristes, organisations de producteurs et metteurs en marché).

L'histoire du développement des variétés de pommier peut se résumer en 4 étapes :

- des variétés locales cultivées spécifiquement dans chaque région, par exemple **'Reinette Clochard'**, **'Belle de Boskoop'**... ;
- des variétés anciennes issues de semis qui se sont développées partout dans le monde : **'Golden Delicious'**, **'Red Delicious'** et ses mutants, **'Granny Smith'**, etc. ;
- la génération de variétés issues de programmes d'amélioration : **'Elstar'**, **'Jonagold'**, **'Gala'**, **'Fuji'**, **'Pink Lady'**. En général, ces variétés répondent à des critères commerciaux (aspect, résistance aux transports,...), mais peuvent présenter parfois de fortes sensibilités aux bio-agresseurs ;

– la nouvelle génération de variétés qui commencent aujourd’hui à apparaître sur le marché issues de programmes d’amélioration incluant résistance aux bio-agresseurs et notamment à la tavelure : **‘Topaz’** (Tchéquie), **‘Goldrush’** (États-Unis), **‘Ariane’** (France)... Ces variétés pourront être cultivées avec un nombre moindre de traitements chimiques ; toutefois, la durabilité de la résistance n’est pas assurée car de nouvelles races de tavelure contournant le gène *Vf* de résistance sont déjà apparues.

Variétés de pommier à fruit d’industrie

Variétés anciennes

‘Douce Moën’, variété ancienne de pommier à cidre. C’est la variété la plus demandée et la plus multipliée. C’est une variété au fruit amer, productive mais alternante (c’est-à-dire dont la production n’a lieu qu’un an sur deux), assez sensible à la tavelure, à l’oïdium et au chancre.

‘Petit jaune’, variété au fruit aigre, utilisée pour la fabrication de jus de pomme et pouvant, en mélange, participer à la fabrication de cidre doux. C’est une variété très productive, mais très alternante et sensible à la tavelure.

‘Kermerrien’, **‘Binet rouge’**, **‘Clos Renaux’**, etc., autres variétés anciennes parmi les plus demandées actuellement.

Variétés récentes

L’année indiquée ici correspond à l’année où la variété a été proposée aux arboriculteurs, sachant que toutes les variétés ont été inscrites en 2000, année d’ouverture du catalogue pommier à cidre.

1981, **‘Judor’** (INRA, France), variété de pommier pour la fabrication de jus et de concentré. C’est un hybride issu d’une variété traditionnelle de pommier à cidre.

1986, **‘Cidor®’** (INRA, France), variété de pommier au fruit amer pour la production de cidre. C’est un hybride issu d’une variété traditionnelle de pommier à cidre, de maturité précoce, assez productive mais alternante.

1986, **‘Judeline®’** (INRA, France), variété de pommier pour la fabrication de jus et de concentré qui connaît un vif succès et qui participe largement au renouveau du verger de pommiers à jus de l’ouest de la France. Elle est issue du programme « résistance à la tavelure ».

Porte-greffe du pommier

À partir du ^{XV}e siècle, la population de pommier **‘Paradis français’** est mentionnée pour son utilisation comme porte-greffe.

1870, première classification des **‘Paradis français’** et **‘Paradis anglais’** établie au Royaume-Uni.

Jusqu’au début du ^{XX}e siècle, les porte-greffe étaient issus de semis de pépins provenant de différentes populations ou génotypes de pommier dont les **‘Paradis’**.

1912, début des travaux de sélection à la Station d'East Malling (Royaume-Uni) conduisant à la diffusion de la série des 'Malling', dont le 'MIX' repéré dès 1917.

1917, '**EM IX**' ou '**M9**' ou '**East Malling IX**' ou '**M9EMLA**' (Station d'East Malling, Royaume-Uni), clone appartenant à la population 'Paradis Jaune de Metz'. Il deviendra l'un des principaux porte-greffe clonaux. 'M9EMLA' a été inscrit en France en 1962. Conférant une vigueur moyenne, ce porte-greffe est très utilisé en Europe.

1917, premier programme d'amélioration des porte-greffe par croisement des porte-greffe de la série des 'Malling' avec la variété 'Northern Spy' tolérante au puceron lanigère. Ces travaux ont conduit à la création en 1956 de '**M26**' et de '**M27**'. '**M26**' ('M16' × 'M9'), conférant une vigueur supérieure à celle de 'M9', est peu utilisé maintenant en raison de son aptitude à produire des racines aériennes (broussins) sur le tronc. '**M27**' ('M13' × 'M9') est un porte-greffe conférant une faible vigueur, également peu utilisé actuellement.

1952, début du programme d'amélioration de la série des 'Malling Merton' qui a conduit à la création de '**MM106**', conférant une forte vigueur, sensible au *Phytophthora cactorum*, inscrit au catalogue en 1967 et encore cultivé actuellement.

1983, '**Cepiland**' et '**Lancep**' (CEP / Ctifl, France), deux porte-greffe clonaux de pommier sélectionnés à partir de la population 'Paradis Jaune de Metz'. Ces porte-greffe, sélectionnés pour leur adaptation aux conditions pédoclimatiques du verger français, confèrent une vigueur moyenne à faible. Ils induisent une mise à fruit rapide, une production régulière et un bon calibre du fruit. Ils sont très utilisés en Europe. 'Cepiland' est un peu plus vigoureux que 'Lancep'. Ces porte-greffe sont commercialisés sous les marques Pajam®-2 et Pajam®-1 respectivement.

1991, '**PI 80**' (VEB Saat- und Pflanzgut, Allemagne), porte-greffe clonal de pommier, issu d'un croisement entre deux porte-greffe de la série des 'Malling', dont 'M9'. De vigueur conférée moyenne, ce porte-greffe est peu sensible au champignon pathogène *Phytophthora cactorum*. Il est utilisé en France. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Supporter®-4.

1993, '**Lizzy**' (Research Institute of Pomology and Floriculture, Pologne), porte-greffe clonal de pommier issu d'un croisement entre un génotype de 'Malling' et la variété greffon 'Antonovka'. Ce porte-greffe a été sélectionné pour sa faible vigueur conférée, sa faible sensibilité au *Phytophthora cactorum* et au froid hivernal.

Variétés de pommier d'ornement

1977, '**Evereste**' (INRA, France), variété de pommier d'ornement résistante à la tavelure, à l'oïdium et au feu bactérien. Elle est aussi utilisée comme pollinisateur dans les vergers de production. Cette variété est commercialisée sous la marque Perpetu®.

1982 ‘**Courtarrow**’ (INRA, France), variété d’ornement issue du croisement ‘Evereste’ par *Malus pumila* ‘Niedzwetzkyana’. La feuille, la fleur et le fruit sont de couleur rouge. Outre la résistance à la tavelure, à l’oïdium et au feu bactérien, cette variété présente une résistance au puceron lanigère. Cette variété est commercialisée sous la marque Coccinella®.

Remarque. Le nombre de variétés cultivées par les arboriculteurs est faible si on le compare au nombre de variétés connues : les plus cultivées aujourd’hui sont les variétés ‘Golden Delicious’, ‘Granny Smith’, les ‘Reinettes’, le groupe des variétés ‘Delicious’ à pomme rouge et le groupe des variétés à pomme bicolore, dont ‘Gala’. La majorité des vergers en Europe sont composés de variétés greffées sur des porte-greffe de type ‘M9’, issus d’une même population ‘Paradis Jaune de Metz’ : la diversité génétique des porte-greffe est donc faible.

Regard sur 50 ans de sélection

L’évolution des vergers durant ces 50 dernières années est plus le fait de modifications des pratiques culturales comme, par exemple, l’augmentation de la densité de plantation (actuellement de 1 500 à 2 500 arbres/ha), que celui de l’innovation variétale. D’ailleurs, les variétés les plus plantées sont des variétés très anciennes (‘Golden Delicious’, les ‘Delicious’ rouges et ‘Granny Smith’) les variétés nouvelles ayant des difficultés à s’imposer (hormis la variété ‘Gala’). Durant ces 50 dernières années, l’amélioration du pommier a surtout consisté à obtenir des résistances aux bio-agresseurs (*cf.* encadré ci-contre). La recherche systématique de mutants apparus, spontanément ou après mutagenèse, a permis d’obtenir de très nombreuses variétés de pommier. Un certain nombre de variétés nouvelles possédant un épiderme bicolore connaissent un certain succès (‘Jonagold’, ‘Elstar’, ‘Gala’); le développement de la variété ‘Gala’ et des ses mutants a été spectaculaire au cours de la décennie 1990.

Pour les porte-greffe, un travail important de caractérisation, puis de sélection dans la population ‘Paradis Jaune de Metz’ a débuté au Royaume-Uni au début du siècle. De nombreux pays ont ensuite sélectionné des clones parmi cette population ou utilisé ‘M9’ dans les croisements. Des porte-greffe clonaux, conférant des vigueur variées et dont les caractéristiques d’adaptation sont spécifiques des conditions pédoclimatiques de chaque pays (résistance au froid, notamment) sont ainsi disponibles.

Les programmes d’amélioration génétique du pommier sont longs et coûteux. La durée de sélection –depuis l’hybridation jusqu’à l’inscription au catalogue– est d’environ 15 ans. En effet, le jeune semis de pommier présente une période juvénile de 4 à 5 années et l’expérimentation des présélections doit se faire après greffage dans les principaux bassins de production. Les critères de sélection concernent l’arbre et le fruit : architecture de l’arbre adaptée au verger moderne, qualité exceptionnelle du fruit et résistances aux principaux bio-agresseurs.

Caractères importants améliorés pour les variétés

Résistances aux maladies. Le pommier est attaqué par de très nombreux bio-agresseurs parmi lesquels des champignons (*Venturia inaequalis* responsable de la tavelure et *Podosphaera leucotricha* à l'origine de l'oïdium), des bactéries (*Erwinia amylovora*, responsable du feu bactérien), des insectes (puceron lanigère ou *Eriosoma lanigerum* et puceron cendré ou *Dysaphis plantaginea*), larves tordeuses de lépidoptères, chenilles mineuses, carpocapse (*Cydia pomonella*) et des acariens (araignées rouges). Cela oblige l'arboriculteur à effectuer plus de 20 traitements phytosanitaires par an.

Des progrès considérables ont été réalisés dans la résistance à la tavelure, au puceron cendré, à l'oïdium et au feu bactérien grâce à des croisements interspécifiques (cf. encadré ci-dessous).

Diversification. La recherche systématique de mutants et le recours à la mutagenèse ont permis d'obtenir des variétés de pommier au port varié et aux couleurs d'épiderme de fruit très diverses. L'hybridation, grâce à la recombinaison génétique, a permis de diversifier considérablement la gamme de variétés, les mutants n'apportant que de petites modifications ponctuelles.

Qualité gustative. Les pommes des variétés sélectionnées récemment ont une bonne tenue à l'étalage et une chair ferme, mais présentent souvent un goût

Un projet européen : *Durable Apple Resistance in Europe* (DARE)

Ce programme, lancé en 1998, a pour objectif la création de variétés possédant une résistance durable à l'oïdium et à la tavelure. Dans le cas de la résistance à la tavelure, par exemple, le gène *Vf* (*Venturia floribunda*) présent dans un grand nombre de variétés récentes, commence à être contourné par de nouvelles souches. L'idée est maintenant de cumuler des résistances majeures monogéniques avec des résistances partielles polygéniques.

Pour cela, il a fallu collecter des souches de ces deux champignons et tester leur pouvoir pathogène sur une large gamme de variétés de pommier. Ces travaux ont permis d'identifier plusieurs variétés possédant une résistance à la majorité, voire à toutes les souches d'agents pathogènes. Un matériel intéressant pour la réalisation de variétés résistantes a donc été rassemblé. Une autre retombée de ce travail a été l'identification des souches appartenant aux races 6 et 7, capables de contourner la résistance apportée par le gène *Vf*.

Il a fallu ensuite analyser les bases génétiques de la résistance du pommier à ces deux agents pathogènes afin de pouvoir localiser des gènes de résistance sur la carte génétique du pommier. Des marqueurs de gènes majeurs de résistance à la tavelure (*Vg*, *Vf*) et de résistance à l'oïdium (*PI-W*, *PI-D12*) ont été cartographiés.

Par ailleurs, des homologues de gènes de résistance d'autres plantes ont été isolés par PCR avec des amorces dégénérées et sont en cours de cartographie.

Enfin, la sélection assistée par marqueurs pour ces deux résistances, a récemment commencé.

neutre. Les nouvelles variétés reconnues de bonne qualité gustative ont des teneurs en sucres et en acides plus élevées que les variétés type ‘Golden Delicious’.

Aptitude à la conservation. C’est une caractéristique essentielle de la pomme par rapport aux autres fruits. Un des objectifs majeurs des programmes d’amélioration est de créer des variétés qui maintiennent leur qualité organoleptique le plus longtemps possible en conservation. Ces variétés de longue conservation constituent l’essentiel des variétés destinées à l’exportation ; elles doivent donc présenter une bonne aptitude au transport et une bonne résistance aux manipulations.

Caractères importants améliorés pour les porte-greffe

Vigueur conférée par le porte-greffe. Un porte-greffe confère une certaine vigueur au greffon qui se manifeste au niveau du développement de la variété. Les différentes sélections ont permis de disposer d’une gamme très étendue de vigueur conférée. Cette gamme s’étend entre une vigueur conférée très faible, « nanisante » (cas du porte-greffe ‘M 27’) et une vigueur conférée forte (cas du porte-greffe ‘MM 106’).

Méthodes utilisées

MÉTHODES D’INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI L’amélioration du pommier est basée sur la recherche de mutants (cf. encadré p. 632). Beaucoup de mutations, comme par exemple, l’absence de rugosité de l’épiderme, ont été utilisées et les mutants sélectionnés ont supplanté la variété d’origine (cas de la variété ‘Red delicious’, par exemple).
Mutagenèse induite	OUI La mutagenèse induite a conduit à des modifications présentant un intérêt pour le producteur et le négociant, à savoir le port de l’arbre et la présentation du fruit (‘Belrène’, ‘Blackjoin BA 2520’, ‘Courtgold’, ‘Courtavel’, ‘Lysgolden’, ‘Bauline’,...) en France ainsi qu’en Autriche, au Canada et au Japon.
Croisements interspécifiques	OUI Les croisements interspécifiques ont permis d’introduire la résistance à de nombreux bio-agresseurs : tavelure, oïdium, feu bactérien, puceron cendré, etc. Les croisements avec <i>Malus floribunda</i> 821 sont à l’origine de l’introduction d’une résistance à la tavelure (gène <i>Vf</i>) et d’une moindre sensibilité au feu bactérien dans la quasi-totalité des variétés modernes (‘Topaz’, ‘Ariane’). ESSAIS Des gènes de résistance à l’oïdium <i>Pl1</i> et <i>Pl2</i> présents chez <i>M. robusta</i> et <i>M. zumi</i> respectivement sont en cours d’introduction par croisements interspécifiques.

suite...

... suite

Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI De nombreuses variétés hybrides triploïdes (triploïdie spontanée) ont été sélectionnées. Elles peuvent être anciennes ('Belle de Boskoop') ou récentes ('Jonagold'). Ces variétés présentent un nombre plus faible de pépins et des fruits d'un calibre un peu plus élevé. Le taux de plantes triploïdes spontanées est de 0,3 % tandis que le taux de variétés triploïdes commercialisées est de 15 %. Les variétés triploïdes sont surtout développées dans le nord de l'Europe où les conditions climatiques ne favorisent pas l'obtention de gros fruits.
Transgénèse	1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1989 au Royaume-Uni. Depuis, de nombreuses équipes dans le monde ont employé cette méthode pour modifier des caractères tels que la sensibilité aux agents pathogènes, l'auto-incompatibilité, la qualité des fruits ou l'enracinement des porte-greffe. Essais au champ et caractères travaillés. De 1991 à 2003, plus de 37 essais au champ de pommiers transgéniques ont été autorisés, principalement aux États-Unis. En France, il n'y a pas d'essais au champ de pommier transgénique et seuls des travaux menés à l'INRA visant à conférer une résistance à la tavelure sont en cours au laboratoire.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI en conditions horticoles Le greffage est utilisé pour multiplier végétativement le pommier depuis plus de 2 000 ans. AUCUNE en culture <i>in vitro</i> La multiplication végétative <i>in vitro</i> est techniquement au point, mais elle n'est pas utilisée pour la multiplication des variétés (greffons). Elle est pratiquée pour l'assainissement seulement (c'est-à-dire pour l'élimination de virus). ESSAIS Des essais de multiplication de pommier sur leurs propres racines sont en cours. Certaines espèces sauvages de <i>Malus</i> sont apomictiques. Il serait intéressant d'exploiter ce caractère pour faire des porte-greffe génétiquement identiques et indemnes de virus.
Sélection sanitaire	OUI La thermothérapie, le microgreffage et le bouturage <i>in vitro</i> sont pratiqués pour l'obtention de plants sains certifiés.
Haploïdisation	ESSAIS Des plantes haploïdes ont été repérées à l'aide d'un marqueur (absence d'anthocyane dans la plantule) ou induites <i>in situ</i> à l'aide de pollen irradié (gynogenèse <i>in situ</i>) ou même induites <i>in vitro</i> par cultures d'anthères (androgenèse <i>in vitro</i>) chez plusieurs variétés ('Golden', 'Florina', 'Topred'). Mais, leur fréquence d'obtention est très faible. Les plantes haploïdes doublées pourraient être éventuellement utilisées en création variétale.

suite...

... suite

Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Le pommier possède une auto-incompatibilité de type gamétophytique. Il est donc nécessaire de placer dans un verger des plantes pollinisatrices.
Marquage moléculaire	Le marquage moléculaire est une technique en plein essor chez le pommier. Le marquage est utilisé, entre autres, pour marquer les résistances monogéniques à la tavelure (<i>Vf</i> , <i>Vg</i>) et à l'oïdium (<i>P11</i> , <i>P12</i> , ...) ou polygéniques. Des cartes génétiques ont été obtenues par différentes équipes notamment dans le cadre des différents programmes européens (EAGMAP, DARE, HiDRAS, ...).

SCHÉMAS DE SÉLECTION ET STRUCTURES VARIÉTALES

Schémas de sélection	Croisements hiérarchiques Croisements factoriels
Structures variétales	Variété clone. Il s'agit de clones issus de semis de hasard, de mutagenèse induite, ou de croisements qui peuvent être spontanés ou provoqués, intra- ou interspécifiques.

La course aux mutants

Une variété doit être multipliée en grande quantité avant d'être diffusée. Les sélectionneurs ont l'habitude de rechercher activement, parmi les plants multipliés, des variants (mutants). Actuellement, on observe d'ailleurs une véritable « course aux mutants ». Dès qu'un mutant est trouvé, celui-ci est décrit, et s'il est distinct, il est inscrit au catalogue officiel afin de pouvoir le commercialiser. En ce qui concerne la protection, 80 % des demandes de COV sont des mutants et seulement 20 % sont des hybrides. Aux États-Unis, 48 brevets ont été déposés concernant des mutants du groupe issu de la variété d'origine 'Delicious'.

Perspectives d'amélioration

Une cinquantaine d'équipes de recherches à travers le monde développe aujourd'hui des programmes de recherches dont le but appliqué est la création de nouvelles variétés. Ils sont répartis sur tous les continents, mais de façon majoritaire en Europe où on compte en moyenne au moins un programme par pays. La France est très active dans ce domaine : outre le programme public INRA, plusieurs obtenteurs privés sont également impliqués dans la création variétale.

L'objectif commun partagé par pratiquement toutes les équipes à travers le monde est de créer de nouvelles variétés régulières en production et combinant d'excellentes qualités (attrait et qualité gustative), de longue conservation et résistantes aux principaux bio-agresseurs : *Venturia inaequalis*, agent de la tavelure, *Podosphaera leucotricha*, responsable de l'oïdium, *Nectria galligena* indui-

sant le chancre à *Nectria*, le puceron cendré, le puceron lanigère et enfin la bactérie *Erwinia amylovora*, responsable du feu bactérien.

Des travaux sur l'architecture de l'arbre sont actuellement conduits par plusieurs équipes ; leur objectif est de sélectionner des variétés productives et régulières en production.

Le pommier a une aire de culture très étendue. Dans les régions présentant des conditions climatiques difficiles pour son développement, des programmes d'amélioration spécifiques sont développés pour créer des variétés adaptées. Les objectifs sont, dans les zones froides (pays nordiques européens, nord de l'Amérique du Nord), l'adaptation à des saisons courtes de végétation et la résistance au froid hivernal et, dans les zones subtropicales (Amérique du Sud, Afrique du Sud), l'adaptation à de faibles besoins en froid.

En ce qui concerne les porte-greffe, face à la faible diversité génétique, il s'agit de créer de nouveaux porte-greffe pour obtenir une gamme de vigueur étendue, en l'associant à la résistance aux maladies (*Phytophthora cactorum* et feu bactérien, notamment). Dans les mêmes zones nordiques que celles citées précédemment, les porte-greffe sont sélectionnés pour leur aptitude à résister au froid hivernal.

Caractères à améliorer

Lutte contre les bio-agresseurs. Elle reste le principal objectif de sélection du pommier. Dans l'amélioration du pommier, les ressources génétiques jouent actuellement un rôle important. Ainsi, des résistances polygéniques à l'oïdium et à la tavelure ont été découvertes dans des variétés anciennes qui ne sont plus utilisées en production. Elles sont maintenant étudiées dans le but d'introduire ces résistances dans des variétés récentes. Actuellement, des hybrides intégrant des caractères de résistance issus d'hybridation interspécifique sont en cours d'évaluation. La problématique principale de ces programmes est la notion de durabilité des résistances.

Résistance aux chocs mécaniques. Ce caractère est essentiel pour que le fruit arrive en très bon état à l'étalage. Un outil de mesure est développé par le Ctifl afin de donner aux différentes variétés une note de sensibilité aux meurtrissures.

Autocompatibilité. Ce caractère n'est pas une priorité des programmes d'amélioration. Toutefois, l'autocompatibilité pourrait être introduite, ce qui permettrait de ne pas avoir à planter des pommiers seulement destinés à la pollinisation dans les vergers. Ce caractère trouve tout son intérêt dans la création de variétés pour le marché des jardiniers amateurs.

Développement d'un seul fruit par inflorescence. L'objectif essentiel est de créer des variétés productives et régulières en production. L'étude du mode de fructification est une approche particulièrement développée à l'INRA. Parmi les caractères étudiés, la production spontanée d'un seul fruit par inflorescence est

un objectif pouvant contribuer à la régularité de production. De plus, ce comportement serait intéressant car l'étape d'éclaircissage chimique serait supprimée, ce qui représenterait une économie pour le producteur.

Qualité du fruit. C'est, bien sûr, le caractère essentiel afin de proposer aux consommateurs, une qualité organoleptique supérieure à celle de 'Golden Delicious', par exemple. Un projet européen (*High-quality Disease Resistant Apples for a Sustainable agriculture*, HiDRAS) est en cours (2003-2006). Il doit permettre de compléter la carte génétique en matière de gènes contrôlant la qualité du fruit, dont ceux impliqués dans des caractères très complexes tels que la texture de la chair.

Techniques à développer

Pour parvenir à lutter contre les bio-agresseurs, des techniques comme l'hybridation interspécifique, les marqueurs moléculaires et la transgénèse devront se développer. La transgénèse pourrait devenir un outil de choix pour introduire, de manière ponctuelle, des résistances dans des variétés d'intérêt.

Obstacles et difficultés

L'arboriculteur dispose actuellement de nouvelles variétés résistantes à un certain nombre de bio-agresseurs. C'est le cas de 'Topaz', 'Initial' et 'Ariane', par exemple. Ces variétés permettent de réduire le nombre de traitements phytosanitaires (8 au lieu de 20), ce qui est bénéfique pour la santé et l'environnement et permet, de plus, à l'arboriculteur de faire des économies. Malheureusement, le développement de ces variétés se heurte au traditionalisme et celles-ci ont une diffusion qui reste, jusqu'à présent, confidentielle. La stratégie de lancement développée pour la variété 'Ariane' pourrait modifier ce constat : les pépiniéristes qui constituent la SARL NOVADI sont à l'origine de la SAS POMALIA. L'objectif de cette dernière est le développement de la nouvelle gamme variétale Les Naturianes® avec pour variété leader la variété 'Ariane'. Dans le même temps, les arboriculteurs devront respecter un itinéraire technique strict permettant de contenir, autant que possible, les souches virulentes de tavelure capables de surmonter la résistance de cette nouvelle gamme variétale.

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue officiel arbres fruitiers.

1986, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés anciennes d'amateurs, homologation du règlement technique d'inscription.

2000, ouverture, par arrêté ministériel, de la liste Pommier à cidre.

En 2003, 234 variétés de pommier à fruit, 113 variétés de pommier à cidre, 24 variétés de porte-greffe et 38 variétés anciennes d'amateurs étaient présentes

sur le catalogue officiel français. Il n'y a pas de catalogue européen. Dans les études de DHS, réalisés par l'INRA d'Angers pour le compte du CTPS, 50 descripteurs morphologiques ou phénologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de deux cycles de production significative de fruits. À l'issue de cet examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée des arbres maintenus en collection de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des scions (ou plants greffés). C'est le Ctifl qui en a la responsabilité par délégation du ministère chargé de l'Agriculture. L'inscription au catalogue officiel est obligatoire pour que la variété puisse entrer dans le système de certification. En 2004, 92 variétés étaient concernées et ces dix dernières années, 2,1 millions de scions certifiés ont été vendus en moyenne par an.

Pour en savoir plus

- Bois D.**, 1927. Pommier. Dans : *Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges : histoire, utilisation, culture*. II. *Phanérogames fruitières*. Ed. Paul Lechevalier, Paris, 264-281.
- Bommineni V.R., Mathews H., Samuel S.B., Kramer M. et Wagner D.R.**, 2001. A new method for rapid in vitro propagation of apple and pear. *Hortscience*, 36 (6), 1102-1106.
- Boré J.-M. et Fleckinger J.**, 1997. *Pommiers à cidre, variétés de France*. INRA Éditions, Paris, 771 p.
- Brischia R., Piccioni E. et Standri A.**, 2002. Micropropagation and synthetic seed in M.26 apple rootstock (II) : a new protocol for production of encapsulated differentiating propagules. *Plant Cell, Tissue Organ Cult.*, 68 (2), 137-141.
- Broothaerts W., Keulemans J. et van Nerum I.**, 2004. Self-fertile apple resulting from S-RNase gene silencing. *Plant Cell Rep.*, 22, 497-501.
- Dosba F. et Lepinasse Y.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.
- Durel C.E. et Parisi L.**, 2001. Des pommiers résistent aux maladies. *Biofutur*, 215, 50.
- Faize M., Malnoy M., Dupuis F., Chevalier M., Parisi L. et Chevreau E.**, 2003. Chitinases of *Trichoderma atroviridae* induce scab resistance and some metabolic changes in two cultivars of apple. *Phytopathology*, 93, 1496-1504.
- Faize M., Sourice S., Dupuis F., Parisi L., Gautier M.F. et Chevreau E.**, 2004. Expression of wheat puroindoline-b reduces scab susceptibility in transgenic apple (*Malus × domestica* Borkh.). *Plant Sci.*, 167, 347-354.
- Gautier M.**, 2001. Pommier, pommier à cidre. Dans : *La culture fruitière*. Volume 2, *Les productions fruitières*. Tec & Doc, Paris, 3-147.
- Harris S.A., Robinson J.P. et Juniper B.E.**, 2002. Genetic clues to the origin of the apple. *Trends Genet.*, 18 (8), 426-430.

- Hemmat M., Weeden N.F., Manganaris A.G. et Lawson D.M.**, 1994. Molecular marker linkage map for apple. *J. Hered.*, 85 (1), 4-11.
- Hofer M. et Lespinasse Y.**, 1996. Haploidy in apple. Dans : *In vitro haploid production in higher plants*, vol. 3 : *Important selected plants*. S.M. Jain, S.K. Sopory et R.E. Veilleux, éd., Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 261-276.
- James D.J., Passey A.J. Barbara D.J. et Bevan M.W.**, 1989. Genetic transformation of apple (*Malus pumila* Mill.). *Plant Cell Rep.*, 7, 658-661.
- James D.J., Passey A.J. et Barbara D.J.**, 1990. Regeneration and transformation of apple and strawberry using disarmed Ti-binary vectors. Dans : *Genetic engineering in crop plants*. G.W. Lycett et D. Grierson, éd., Butterworths, Londres, 239-248.
- Jeannequin B., Dosba F. et Amiot-Carlin M.J., coord.**, 2005. *Fruits et légumes : caractéristiques et principaux enjeux*. INRA Éditions, Paris, 115 p.
- Ko K.S., Norelli J.L., Reynold J.-P., Aldwinckle H.S. et Brown S.K.**, 2002. T4 lysozyme and attacin genes enhance resistance of transgenic 'Galaxy' apple against *Erwinia amylovora*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 127, 515-519.
- Laurens F.**, 1999. Review of the current apple breeding programmes in the world : objectives for scion cultivar improvement. *Acta Hortic.*, 484, 163-170.
- Lespinasse Y. et Godicheau M.**, 1980. Création et description d'une plante haploïde de pommier (*Malus pumila* Mill.). *Ann. Amélior. Plant.*, 30 (1), 39-44.
- Lespinasse Y.**, 1992. Le pommier. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 577-604.
- Lespinasse Y., Durel C.E., Laurens F., Chevalier M., Parisi L. et Pinet C.**, 2000. An european project : DARE – *Durable Apple Resistance in Europe* (FAIRS CT97-3898). Durable resistance of apple to scab and powdery-mildew : one step more towards an environmental friendly orchard. *Acta Hortic.*, 538, 197-200.
- Masseron A.**, 1989. *Les porte-greffe pommier, poirier et nashi*. Éditions Ctifl, Paris, 287 p.
- Masseron A. et Simard M.-H.**, 2001. Les porte-greffe du pommier : 20 ans d'études en France, 1^{re} partie, *Arbor. Fruit.*, 555, 37-43.
- Masseron A. et Simard M.-H.**, 2002. Les porte-greffe du pommier : 20 ans d'études en France, 2^e partie, *Arbor. Fruit.*, 556, 67-71.
- Murata M., Haruta M., Murai N., Tanikawa N., Nishimura M., Homma S. et Itoh Y.**, 2000. Transgenic apple (*Malus × domestica*) shoot showing low browning potential. *J. Agric. Food Chem.*, 48 (11), 5243-5248.
- Norelli J.L., Aldwinckle H.S., Destefano-Beltran L. et Jaynes J.M.**, 1994. Transgenic 'Malling 26' apple expressing the attacin E gene has increased resistance to *Erwinia amylovora*. *Euphytica*, 77 (1/2), 123-128.
- Patocchi A., Gianfranceschi L. et Gessler C.**, 1999. Towards the map-based cloning of Vf: fine and physical mapping of the VfRegion. *Theor. Appl. Genet.*, 99 (6), 1012-1017.
- Renagold J.P., Glover J.D., Andrews P.K. et Hinman H.R.**, 2001. Sustainability of three apple production systems. *Nature*, 410, 926-929.
- Smith M.W.G.**, 1971. National Apple Register of the United Kingdom (published by Ministry of Agriculture, Fisheries and Food), London, 652 p.
- Tartarini S.**, 1996. RAPD markers linked to Vf gene for scab resistance in apple. *Theor. Appl. Genet.*, 92 (7), 803-810.
- Trillot M., Masseron A. et Tronel C.**, 1993. *Pomme, les variétés*. Éditions CTIFL, Paris, 203 p.
- Trillot M., Masseron A., Mathieu V., Bergougnieux F., Hutin C. et Lespinasse Y.**, 2002. *Le pommier*, monographie. Éditions Ctifl, Paris, 287 p.
- Yang H.Y., Korban S.S., Kruger J. et Schmidt H.**, 1997. The use of a modified bulk segregant analysis to identify a molecular marker linked to scab resistance gene in apple. *Euphytica*, 94 (2), 175-182.

Zhang Y.G., Chevreau E. et Lespinasse Y., 1988. Obtention de plantes haploïdes de pommier (*Malus × domestica* Borkh.) issues de parthénogenèse induite *in situ* par du pollen irradié et culture *in vitro* de pépins immatures. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 307, 451-457.

Zhu L.H., Ahlman A., Li X.Y. et Welander M., 2001. Integration of the *rolA* gene into the genome of the vigorous apple rootstock A2 reduced plant height and shortened internodes. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 76, 758-763.

Les porte-greffe de *Prunus*

Prunus L. spp. (nombre de base $x = 8$)
(Rosacées)

Présentation des espèces

Les *Prunus* L. sont originaires et se sont diversifiés sur plusieurs continents (Asie, Amérique du Nord, Europe). Les premières greffes ont probablement été réalisées en Chine. Depuis l'Antiquité, les cinq grands types d'arbres fruitiers du genre *Prunus* cultivés en Europe (abricotier, amandier, cerisier *Prunus avium* L., pêcher et prunier) sont greffés sur des porte-greffe pouvant appartenir à la même espèce (greffe homospécifique) ou à une espèce différente (greffe hétérospécifique). L'utilisation d'un porte-greffe a eu uniquement pour rôle, jusque dans la première moitié du XX^e siècle, de multiplier végétativement les génotypes intéressants que l'on ne savait pas multiplier par bouturage ou marcottage. Par la suite, le porte-greffe a eu d'autres fonctions telles que le contrôle de la croissance et de la fructification des variétés greffées ou l'extension des zones de culture de certaines espèces fruitières.

Les porte-greffe de *Prunus* sont des plantes pérennes, appartenant à des espèces autogames ou allogames. Les sélections de porte-greffe sont multipliées par multiplication végétative ou par reproduction sexuée. De nombreux croisements interspécifiques spontanés entre les centaines d'espèces du genre *Prunus* peuvent se produire. Par exemple, le prunier myrobolan (*P. cerasifera* L.) se croise avec l'abricotier (*P. armeniaca* L.) pour donner des hybrides désignés sous l'appellation « abricotier noir » (*P. × dasycarpa* L.). De même, l'amandier (*P. dulcis* L.) se croise de manière spontanée avec le pêcher (*P. persica* L.). Ces hybrides interspécifiques sont le plus souvent fertiles. Cependant, dans le cas d'utilisation en porte-greffe, ils ne fleurissent ni ne fructifient. Il y a donc, en général, peu de risque de dissémination incontrôlée lorsque les *Prunus* sont utilisés comme porte-greffe, mais il peut parfois exister des repousses ou des drageons de porte-greffe dans des vergers mal entretenus ou abandonnés qui peuvent fleurir et fructifier.

Les *Prunus* ont des centres d'origine dispersés dans tout l'hémisphère Nord. Certaines espèces de *Prunus* ont une répartition très large. La variabilité génétique disponible pour la sélection de porte-greffe de *Prunus* est considérable. Des collections botaniques importantes comprenant des ressources génétiques de la plupart des espèces du genre *Prunus* sont conservées à l'INRA d'Avignon (Vaucluse) et de Bordeaux (Gironde). La mission de Centre de ressources génétiques (CRG) pour les *Prunus* a été récemment attribuée à l'INRA de Bordeaux. Environ 3 000 génotypes (espèces botaniques, hybrides interspécifiques et variétés traditionnelles) y sont conservés pour l'ensemble des collections *Prunus* auxquels on peut ajouter 2 500 génotypes créés à des fins scientifiques (populations utilisées pour des travaux de cartographie moléculaire). Pour les porte-greffe *Prunus*, le nombre de génotypes est d'environ 500 appartenant à une cinquantaine d'espèces différentes et à une soixantaine de combinaisons interspécifiques, auquel il faut ajouter environ 400 génotypes appartenant à des descendances utilisées pour la cartographie génétique. Les problèmes majeurs sont, pour ces plantes pérennes à multiplication végétative, d'ordre sanitaire. La progression ou l'émergence de maladies graves comme la sharka due au virus de la variole des *Prunus* (*Plum pox virus*, PPV), transmise par puceron, ou la bactériose due à *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*, imposent des conditions protégées de conservation des ressources génétiques (conservation en tunnel à l'abri des insectes pour éviter une contamination par la maladie de la sharka) et limitent l'échange de matériel végétal. Une politique de suivi sanitaire et de contrôle se met en place pour réduire ce problème.

Production et utilisation

Le matériel destiné à la production de porte-greffe est constitué de semences hybrides ou issues de lignées pures, de boutures ou de plants provenant de multiplication *in vitro*. Le matériel utilisé pour la production de scions est donc constitué de plants d'un an, issus de semis, ou de boutures racinées ou de plants provenant de culture *in vitro*.

Si on considère que la totalité des principaux types cultivés de *Prunus* (abricotier, amandier, cerisier, pêcher et prunier) est greffée, la surface plantée en porte-greffe de *Prunus* peut être évaluée à 6,6 millions d'hectares dans le monde. En France, cette surface est estimée à 73 000 ha.

Histoire des variétés cultivées en France

Principales variétés

■ **Avant l'ouverture de la rubrique porte-greffe** dans le catalogue officiel des variétés d'arbres fruitiers

'**Damas noir de Toulouse**', prunier porte-greffe pour le pêcher, très anciennement connu. Il a été largement répandu dans la vallée du Rhône en raison de

ses qualités culturales et de sa facilité de multiplication. Mais, il était infesté par des viroses graves. Il n'est plus utilisé actuellement.

'Damas de Toulouse GF 1869' (INRA, France), clone sain de prunier 'Damas noir de Toulouse' servant de porte-greffe pour le pêcher. Il résiste bien à la chlorose et à l'asphyxie racinaire. Il s'agit d'un clone pentaploïde, hybride supposé entre le prunier domestique (*P. domestica* L., 6x) et le prunellier (*P. spinosa* L., 4x), probablement comme tous les génotypes de la population de 'Damas noir de Toulouse'. Son principal défaut rédhibitoire réside dans sa grande aptitude au drageonnement. Il n'est plus utilisé actuellement.

'Nemaguard' (USDA Weinberger, États-Unis), lignée de pêcher donnant un semis homogène. Cette variété est intéressante pour sa résistance aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.), mais elle est très sensible à la chlorose. Elle est très peu utilisée en France.

'Amandier × Pêcher GF 677' (INRA, France), hybride naturel entre l'aman-dier et le pêcher qui sert de porte-greffe pour chacune de ces deux espèces. Il se caractérise par une très bonne vigueur, une tolérance à la chlorose ferrique et une grande facilité de multiplication par culture *in vitro*. En raison de ses qualités, il a été largement diffusé depuis 30 ans dans le monde et, en particulier, dans le Bassin méditerranéen. Il est toujours très utilisé actuellement.

'Sainte-Lucie 64' (INRA, France), porte-greffe de vigueur moyenne pour le cerisier. Ce clone a été sélectionné à partir d'une population naturelle de cerisier Sainte-Lucie (*P. mahaleb* L.), espèce voisine du cerisier doux (*P. avium*).

'Pêcher franc GF 305' (INRA, France), lignée de pêcher donnant des semis homogènes. Ce porte-greffe est intéressant du fait de sa bonne homogénéité, de sa compatibilité avec toutes les variétés de pêcher et de sa vigueur satisfaisante. Il est, toutefois, sensible à de nombreux bio-agresseurs et est fréquemment utilisé comme indicateur biologique de viroses.

'Marianna GF 8-1' (INRA, France), hybride triploïde, issu de croisements interspécifiques non contrôlés entre différentes espèces de prunier. Il possède une très grande résistance à l'asphyxie racinaire. Néanmoins, ce porte-greffe présente le défaut de manifester une incompatibilité avec le pêcher (déperissement du greffon) et l'abricotier (rupture au niveau du point de greffage). Cet inconvénient peut être contourné chez l'abricotier en réalisant une greffe intermédiaire. Ce porte-greffe est très facilement contaminé par un phytoplasme de type enroulement chlorotique de l'abricotier (*European stone fruit yellows*).

'Merisier F 12-1' (East Malling, Royaume-Uni), première sélection clonale de *P. avium*. Ce merisier est utilisé comme porte-greffe pour le cerisier.

■ **Après l'ouverture de la rubrique porte-greffe** dans le catalogue officiel des variétés d'arbres fruitiers

1971, **'Manicot GF 1236'** (INRA, France), semis de porte-greffe d'abricotier, obtenu par autofécondation d'un clone de *P. armeniaca*. Ce porte-greffe est

intéressant en raison de la relativement bonne homogénéité de ses semis et de sa vigueur correcte.

1973, '**Amandier × Pêcher GF 557**' (INRA, France), porte-greffe obtenu par hybridation contrôlée entre un amandier et la variété de pêcher 'Shalil'. C'est un des tout premiers exemples (sinon le tout premier) d'hybride interspécifique obtenu par croisement contrôlé. Il a été sélectionné comme porte-greffe pour le pêcher essentiellement. Il s'est avéré plus résistant aux nématodes qu'Amandier × Pêcher GF 677' et tolérant au calcaire, mais il n'est pas utilisé en raison de sa sensibilité à l'asphyxie racinaire.

1973, '**Saint-Julien hybride n° 2**' (INRA, France), porte-greffe de semis obtenu par croisement de deux variétés de prunier (*P. domestica* ssp. *insititia* (L.) Schneid.) auto-incompatibles : 'Saint-Julien d'Orléans' et 'Brompton EM'. Il est utilisé comme porte-greffe du pêcher et du prunier. Il a été sélectionné pour pallier l'hétérogénéité du porte-greffe 'Saint-Julien d'Orléans', qui pouvait même se traduire par des problèmes d'incompatibilité de greffage avec le pêcher.

1980, '**Pêcher franc Rubira**' (INRA, France), lignée de pêcher franc donnant un semis homogène, porte-greffe de pêcher ou d'abricotier. La couleur pourpre du feuillage est intéressante car elle permet de contrôler facilement la reprise de greffe. De plus, les variétés d'abricotier greffées sur ce porte-greffe présentent une moindre sensibilité au chancre bactérien dû à *Pseudomonas* spp. Cette qualité lui vaut d'être très utilisé dans la Drôme où cette maladie est un problème majeur. Enfin, ce porte-greffe possède une résistance au puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*), mais a le défaut d'être peu vigoureux et de présenter des problèmes de mortalité inexplicables, lorsqu'il est greffé avec un pêcher.

1982, '**Myrest**' (INRA, France), clone de myrobolan très polyvalent, sélectionné surtout comme porte-greffe du pêcher et de l'amandier, mais également compatible avec le prunier domestique. Il est sensible au cancer végétal (ou *crown-gall* dû à la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*), mais présente une résistance relative au pourridié des racines dû à un armillaire (*Armillaria mellea*). Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Myrabi®.

1982, '**Pêcher franc Chanturgue**' (INRA, France), lignée de pêcher franc donnant un semis homogène servant de porte-greffe pour le pêcher. Cette lignée est intéressante du fait de sa relativement bonne homogénéité, de sa vigueur correcte et de sa tolérance à la chlorose ferrique (sols calcaires). Elle est très utilisée en France actuellement. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Montclar®.

1986, '**Fercino**' (INRA, France), clone de myrobolan. Porte-greffe du prunier domestique, il est vigoureux et plus résistant à la chlorose ferrique et à l'asphyxie racinaire que les autres clones de myrobolan étudiés. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Myrocal®.

1986, '**Ferciana**' (INRA, France), clone de porte-greffe polyvalent. C'est un hybride interspécifique complexe, résultant d'une hybridation 4 voies entre

pruniers et pêcher (*P. cerasifera* Ehr × *P. salicina* Lindl.) × (*P. cerasifera* × *P. persica*). Ce porte-greffe est sensible à l'asphyxie racinaire. Il est commercialisé sous la marque Ishtara®.

1987, '**Fercadeu**' (INRA, France), semis homogène de merisier (*P. avium*) utilisé comme porte-greffe de cerisier. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Pontaris®.

1987, '**Brokforest**' (Brooks Lyle, Oregon, États-Unis), porte-greffe de cerisier très polyvalent, issu d'une hybridation entre le cerisier Sainte-Lucie (*P. mahaleb*) et *P. avium*. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Maxma 14 Delbard®.

1988, '**Fereley**' (INRA, France), clone issu d'un croisement interspécifique entre *P. salicina* Lindley et le prunellier (*P. spinosa*), utilisé comme porte-greffe de pêcher. Il se caractérise par une bonne compatibilité de greffage, une bonne adaptation aux sols lourds et une bonne tolérance à l'asphyxie racinaire. Il est propagé par culture *in vitro* comme la plupart des porte-greffe clonaux de *Prunus*. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Jaspi®.

1989, '**Avifel**' (INRA, France / Ctifl, France), porte-greffe pentaploïde d'abricotier, tolérant à l'asphyxie racinaire, issu d'un croisement interspécifique probable entre le prunier domestique (*P. domestica* subsp. *domestica*) et le prunellier. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Torinel®.

1989, '**Avimag**' (INRA, France / GYDFV, Hongrie), variété hybride interspécifique entre le pêcher (*P. persica*) et une espèce sauvage (*P. davidiana* Carr. Franch.) proche du pêcher. Ce porte-greffe pour pêcher et amandier est en cours de développement pour remplacer 'GF 677', du fait notamment de sa plus grande résistance à l'humidité. Il est aussi résistant au nématode à galles *Meloidogyne incognita* (mais reste sensible à un autre nématode à galles *M. javanica*). Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Cadaman®.

1989, '**Edabriz**' (INRA, France / Ctifl, France), porte-greffe pour le cerisier conférant une faible vigueur. C'est le premier porte-greffe véritablement « nanisant ». La réduction de la vigueur se situe entre 40 et 60 % par rapport à la variété standard de porte-greffe 'Merisier F 12-1'. Ce porte-greffe a permis la relance de la culture du cerisier avec la mise en place de vergers « piétons ». Ce clone a été sélectionné dans la variabilité naturelle du cerisier acide (*P. cerasus* L.), espèce voisine du cerisier doux (*P. avium*). Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Tabel®.

1991, '**Ferci**' (INRA, France), porte-greffe de cerisier, issu de semis obtenus par autofécondations contrôlées du porte-greffe 'Sainte-Lucie SL 405' (*P. mahaleb*). Il confère aux variétés greffées un niveau de vigueur identique à 'Sainte-Lucie 64', une entrée en production plus rapide et une insertion de la ramification avec des angles plus ouverts. Il est plus résistant à l'asphyxie racinaire que 'Sainte-Lucie 64'. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Pontaleb®.

1997, '**Broksec**' (Brooks Lyle, États-Unis), porte-greffe de cerisier, issu d'une hybridation entre *P. mahaleb* et *P. avium*, adapté aux sols secs et pauvres. Ce porte-greffe est commercialisé sous la marque Maxma 60 Delbard®.

1997, '**Gisela 5**' (Consort. Deuts. Baum., Allemagne), porte-greffe de cerisier « nanisant » et permettant une mise à fruit rapide. Cette variété est issue d'un croisement interspécifique entre le cerisier acide *P. cerasus* et l'espèce sauvage *P. canescens* L.

Remarque. La création de porte-greffe performants a permis d'élargir les zones de culture traditionnelles de certaines espèces fruitières. Les variétés actuelles de porte-greffe de type clone ou lignée, donnant des semis homogènes, sont beaucoup plus homogènes et stables que les variétés anciennes issues de semis tout venant. Les semis tout venant provenaient (et proviennent encore) de pools génétiques restreints (par exemple, semis de pêcher tout venant de la population *P. persica* var. *sylvestris* des Balkans) et d'une diversité d'espèces limitée (souvent les mêmes espèces que les variétés fruitières greffées). Un petit nombre de variétés clonales est cultivé sur de grandes surfaces en France, ce qui a, sans doute, diminué la diversité des porte-greffe cultivés. Cependant, le travail d'amélioration et le recours important aux ressources génétiques, effectués notamment par l'INRA, ont permis d'introduire une variabilité génétique considérable provenant d'espèces sauvages du genre *Prunus* (en particulier avec le recours très important à l'hybridation interspécifique). L'examen du catalogue officiel montre que la diversité des porte-greffe *Prunus* disponible est très importante et tend plutôt à augmenter au cours du temps, ce qui n'est d'ailleurs pas sans poser de problèmes aux pépiniéristes producteurs de plants (gestion d'un nombre très élevé de combinaisons variétés/porte-greffe).

Regard sur 50 ans de sélection

La sélection des porte-greffe de *Prunus* n'a vraiment débuté qu'à la fin de la seconde guerre mondiale. Des programmes de recherches menés principalement en France (INRA), en Belgique et au Royaume-Uni, ont contribué durant ces 50 dernières années à un véritable essor de l'amélioration génétique des porte-greffe d'arbres fruitiers à noyau. Le passage de semis issus de fécondations libres, à des lignées, des hybrides et des clones a été le moteur d'une amélioration remarquable de la performance des vergers. L'hybridation interspécifique, en permettant l'introduction de nombreux caractères favorables, a trouvé une utilisation majeure dans la sélection des porte-greffe de *Prunus*. La sélection et la mise en place d'un système de certification ont permis de maîtriser de mieux en mieux les problèmes phytosanitaires.

Caractères importants améliorés

Homogénéité. Les structures variétales ont évolué de manière à obtenir des variétés de plus en plus homogènes. Le développement des porte-greffe clonaux,

grâce à la mise au point de techniques de bouturage et de multiplication végétative *in vitro*, a eu un rôle prédominant dans l'amélioration de l'homogénéité. Cependant, les porte-greffe de semis sont toujours utilisés du fait de leur prix d'achat 3 à 4 fois moindre que celui des clones.

Vigueur. Pour des espèces telles que le cerisier, des porte-greffe « nanisants », c'est-à-dire réducteurs de vigueur, sont recherchés. Ceux-ci ont plusieurs avantages : une réduction du volume des arbres permettant de créer des vergers à haute densité, une réduction de la pénibilité et du temps de travail lors de la taille ou de la récolte, une réduction de l'effet des traitements chimiques sur l'environnement grâce à un meilleur contrôle, une diminution des traitements phytosanitaires et une mise à fruit rapide. Par contre, pour d'autres espèces telles que le pêcher ou l'amandier qui est récolté mécaniquement, le sélectionneur recherche des porte-greffe qui apportent de la vigueur, nécessaire notamment dans les situations de replantation (phénomène de fatigue des sols). Par exemple, une gamme de pruniers porte-greffe diploïdes, triploïdes, pentaploïdes ou hexaploïdes, conférant différents niveaux de vigueur, a été obtenue pour le pêcher (mais il n'y a pas de lien direct entre la vigueur induite et le niveau de ploïdie).

Adaptation à différentes conditions pédoclimatiques. Un des rôles essentiels du porte-greffe est de permettre la culture d'arbres fruitiers dans des sols défavorables. C'est ainsi qu'ont été sélectionnées des variétés tolérantes à des sols secs, hydromorphes, calcaires ou salins. Le problème de l'asphyxie racinaire est important dans le cas du pêcher, de l'abricotier et de l'amandier. Des porte-greffe pour pêcher, tolérants aux sols inondés, ont été obtenus par croisements interspécifiques entre différentes espèces de prunier. De même, certains porte-greffe de type pêcher/amandier ont permis la culture du pêcher sur sol calcaire.

Résistance aux bio-agresseurs

Résistance du porte-greffe. Des porte-greffe tolérants ou résistants à des maladies cryptogamiques (*Phytophthora*, pourridié à armillaire dû à *Armillaria mellea*,...), des maladies bactériennes (*crown-gall* dû à *Agrobacterium tumefaciens*, chancre bactérien causé par *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*,...), des maladies virales et des ravageurs (pucerons, nématodes,...) ont été créés. Par exemple, *Prunus besseyi* L.H. Bailey et *P. davidiana* ont été utilisés avec succès pour produire des porte-greffe respectivement résistants à *Agrobacterium tumefaciens* et aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.). La culture des *Prunus* dans plusieurs pays du Bassin méditerranéen et, en particulier au sud de l'Espagne, a pu être maintenue grâce à l'obtention de porte-greffe résistants aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.).

Résistance conférée au greffon. Le porte-greffe confère généralement une meilleure vigueur au greffon, ce qui influe parfois positivement sur sa résistance aux bio-agresseurs. De plus, le greffage sur certains porte-greffe a permis d'induire des résistances ou des tolérances à la variété greffée. Par exemple, les variétés d'abricotier greffées sur le porte-greffe 'Pêcher franc Rubira' expriment une moindre sensibilité au chancre bactérien dû à *Pseudomonas* spp.

Aptitude au greffage. Les porte-greffe sont sélectionnés, de préférence pour un port dressé et pour une aptitude à produire peu de ramifications secondaires. Ces deux caractéristiques diminuent le temps de préparation du plant porte-greffe avant greffage et facilitent le greffage. Des travaux ont aussi dû être conduits pour créer des porte-greffe compatibles au greffage hétérospécifique. C'est ainsi que de longs travaux de sélection ont été effectués avant que le greffage de pêcher sur prunier ne devienne possible grâce à la sélection de porte-greffe compatibles. Les problèmes rencontrés dans les greffages homospécifiques sont dus à la présence de virus. Des variétés de greffon peuvent, en effet, être contaminées par des virus sans qu'il y ait de symptôme apparent. Le greffage d'un greffon contaminé sur certains porte-greffe (ou inversement) peut occasionner une réaction d'hypersensibilité du porte-greffe au niveau du point de greffage qui peut se traduire par un rejet du greffon.

Aptitude à la multiplication. Pour qu'un porte-greffe connaisse un succès commercial, il est important que celui-ci possède un bon taux de multiplication sexuée ou végétative, selon la structure génétique variétale désirée.

Aide au greffage. Le feuillage de certains porte-greffe tels que 'Pêcher franc Rubira' est pourpre. Après greffage, l'observation de la couleur généralement verte du feuillage de la variété greffée apparaissant à partir du point de greffe permet de savoir rapidement si le greffage est réussi ou non et d'ébourgeonner rapidement le porte-greffe.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	ESSAIS Le gène <i>Ma</i> , conférant une résistance aux nématodes à galles et introduit à partir de l'espèce <i>P. cerasifera</i> , est en cours d'exploitation.
Mutagenèse induite	AUCUNE La mutagenèse a été employée pour améliorer différents <i>Prunus</i> (cerisier, pêcher, abricotier,...), mais pas dans l'objectif de créer des porte-greffe.
Croisements interspécifiques	OUI (quelques exemples) Croisement spontané entre l'amandier et le pêcher pour obtenir une bonne vigueur ('Amandier × Pêcher GF 677'). Croisement interspécifique contrôlé du pêcher avec l'amandier pour obtenir une résistance aux nématodes à galles et une bonne vigueur ('Amandier × Pêcher GF 557'). Croisements interspécifiques contrôlés dans le but d'obtenir des porte-greffe résistants à l'asphyxie racinaire ('Ferciana', 'Yumir', 'Avifel', 'Fereley'). Les croisements interspécifiques sont relativement faciles à réaliser dans le genre <i>Prunus</i> . À maturité, les graines sont fréquemment mises à germer en conditions <i>in vitro</i> .
	ESSAIS (en cours) Croisements entre prunier myrobolan et hybride (amandier × pêcher). Des croisements entre des clones de prunier myrobolan porteurs du gène <i>Ma</i> de résistance aux nématodes à galles <i>Meloidogyne</i> spp. et des clones d'abricotier issus de la variété 'Stark Early Orange', résistante à la sharka, sont réalisés de manière à sélectionner des porte-greffe résistants à la sharka, aux nématodes à galles et de bonne compatibilité de greffage avec les variétés d'abricotier (de tels hybrides sont appelés <i>Prunus</i> × <i>dasycarpa</i>).
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Des porte-greffe de différents niveaux de ploïdie ont été sélectionnés. Niveau triploïde. Des porte-greffe triploïdes spontanés ont été sélectionnés : porte-greffe de prunier ('Marianna GF 8-1') Niveau pentaploïde. Des porte-greffe pentaploïdes d'abricotier ont été obtenus par croisements de <i>P. domestica</i> avec <i>P. spinosa</i> ('Avifel'). De même, il existe des pruniers pentaploïdes résultant d'hybridation spontanée qui peuvent servir de porte-greffe ('Damas de Toulouse', 'GF 1869').
Transgénèse	ESSAIS La diversité génétique est tellement importante qu'il n'est généralement pas nécessaire de faire appel aux techniques de transgénèse. Néanmoins, certains caractères ponctuels tels que la résistance à la sharka présentent une très faible variabilité au sein du genre <i>Prunus</i> . L'introduction d'une résistance à la sharka, en exprimant le gène codant la capsid du virus, a été réalisée et est en cours d'évaluation.

suite...

... suite

Il pourrait être intéressant de recourir à la transgénèse pour corriger les défauts de certains porte-greffe présentant, par ailleurs, un ensemble de qualités exceptionnelles et qu'il serait très difficile de recréer par hybridation, par exemple la correction de l'incompatibilité de greffe chez le prunier 'Marianna GF 8-1'.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplification végétative	OUI Les variétés clonales sont multipliées par culture <i>in vitro</i> , ou par bouturage horticoles herbacé, ligneux ou semi-ligneux.
Sélection sanitaire	OUI La thermothérapie et dans une moindre mesure le microgreffage et le microbouturage <i>in vitro</i> , sont utilisés pour assainir les porte-greffe vis-à-vis des virus et pour accélérer la multiplication des hybrides. Les ressources génétiques sont assainies par culture de méristèmes et par thermothérapie.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE Il existe des stérilités mâles, mais celles-ci ne sont pas utilisées en sélection.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Une auto-incompatibilité de type gamétophytique, présente chez certains <i>Prunus</i> , est un obstacle à la réalisation de lignées pures qui est pourtant une bonne solution pour obtenir des semis homogènes de porte-greffe. L'auto-incompatibilité peut avoir son utilité pour faire des semis de variétés comme 'Saint-Julien hybride n° 2'.
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs moléculaires de la résistance aux nématodes ou à la sharka et de compatibilité sont activement recherchés. Certains (gène <i>Ma</i> de résistance aux nématodes à galles) sont en cours d'utilisation en sélection assistée par marqueurs. Des marqueurs sont utilisés pour évaluer la diversité génétique afin de mieux gérer les ressources génétiques.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection simple de clones dans la variabilité naturelle des <i>Prunus</i> cultivés ou sauvages ('Sainte-Lucie 64'). Sélection de clones après des croisements intraspécifiques ou interspécifiques ('Ferdor' Julior [®] , 'Ferciana'). Sélection généalogique pour créer des variétés lignées pures ('Pêcher franc GF 305'). Ce schéma de sélection n'a pu être utilisé que sur les espèces présentant une bonne autofertilité (pêcher, abricotier,...).
Types variétaux	Variété clonale ('Sainte-Lucie 64') Variété lignée pure ('Pêcher franc GF 305') Variété hybride de clones. Des hybrides de première génération sont obtenus par croisement de parents hétérozygotes. Ces hybrides peuvent être valorisés sous forme de clones ('Amandier × Pêcher GF 557') ou de semis ('Saint-Julien hybride n° 2').

Perspectives d'amélioration

Des progrès considérables sont encore possibles dans plusieurs domaines :

- l'adaptation aux sols, qui prend toute son importance dans un contexte de changement climatique, d'irrégularité accrue du climat et de gestion nécessaire des ressources hydriques ;
- la résistance aux bio-agresseurs (intrinsèque ou conférée) dont l'importance a augmenté en raison de la recrudescence de nombreux parasites et de la limitation nécessaire ou l'interdiction de certains traitements pesticides,
- le contrôle de la vigueur et de la fructification qui reste un enjeu important dans un contexte économique concurrentiel difficile.

Le progrès génétique sur les porte-greffe d'arbres fruitiers à noyau peut avoir une répercussion considérable sur le maintien de ces productions fruitières, comme a eu, par exemple, la diffusion des porte-greffe « nanisants » pour la culture du cerisier ces quinze dernières années. L'importance des ressources génétiques disponibles et les possibilités considérables qu'offre l'hybridation interspécifique pour mener à bien ces programmes permettent d'envisager un progrès génétique encore important. Cependant, la complexité des caractères sélectionnés et la durée de l'amélioration génétique des porte-greffe placent les équipes en charge de ces programmes, devant des défis importants à relever pour l'avenir.

Malheureusement, dans la plupart des pays, y compris en France, on assiste plutôt actuellement à une diminution des investissements cognitifs sur les plantes et les caractères particulièrement difficiles à étudier. Il reste à souhaiter que les acquis considérables obtenus ces dernières années sur des plantes modèles (fonctionnement racinaire, par exemple) puissent être transférés et trouver une application dans le domaine de l'amélioration génétique des porte-greffe.

Enfin, l'évolution des techniques de production de plants fruitiers vers des méthodes de production hors sol, en milieu de plus en plus artificiel, aura probablement des répercussions importantes sur la hiérarchisation des critères de sélection des porte-greffe qu'il convient dès à présent d'évaluer.

Les programmes d'amélioration génétique des porte-greffe de *Prunus* sont essentiellement pris en charge par des instituts de recherches publiques, principalement en Europe (France, Italie, Espagne, Royaume-Uni, Allemagne) et en Amérique du Nord (États-Unis, Canada), qui resteront probablement les principaux artisans du progrès génétique dans ce domaine. Cependant, des sociétés privées (Zaiger Genetics aux États-Unis, Agromillora Catalana en Espagne, par exemple) accordent une part de plus en plus importante aux programmes d'amélioration génétique des porte-greffe et viennent peu à peu prendre place dans le cercle restreint des obtenteurs de porte-greffe.

Caractères à améliorer

Caractéristiques intrinsèques du porte-greffe. Des progrès peuvent encore être obtenus dans la résistance aux bio-agresseurs, l'adaptation aux différents types de sol et dans la compatibilité de greffage. Un travail important est en cours pour sélectionner des porte-greffe résistants aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.). Ce travail associe des laboratoires italiens, espagnols et français. Des variétés de pêcher et d'amandier résistantes à certaines espèces de *Meloidogyne* sont croisées avec le prunier myrobolan porteur du gène *Ma*, conférant une résistance à l'ensemble des espèces de *Meloidogyne*. La construction de génotypes cumulant ces gènes de résistance devrait permettre d'accroître la durabilité de la résistance à *Meloidogyne* spp.

Caractéristiques conférées au greffon. L'exploitation de la biodiversité devrait permettre de sélectionner des porte-greffe conférant aux greffons les caractéristiques suivantes.

Augmentation ou diminution de la vigueur conférée (gamme de vigueur). En France, les *Prunus* sont cultivés dans des conditions pédoclimatiques assez différentes nécessitant l'usage de porte-greffe variés. Par ailleurs, les objectifs de contrôle de la vigueur sont variables d'une espèce à l'autre (recherche d'une faible vigueur chez le cerisier et d'une forte vigueur pour le pêcher et l'amandier), et parfois même à l'intérieur d'une même espèce en fonction de la variété ou des systèmes de culture. Pour chacune de ces conditions de culture, il manque donc des porte-greffe pour couvrir la gamme de vigueur conférée aux variétés greffées. Par exemple, seul le porte-greffe d'abricotier 'Avifel' est parfaitement adapté aux sols hydromorphes des Pyrénées-Orientales. Ce porte-greffe confère à la variété une faible vigueur et ne convient donc pas aux variétés peu vigoureuses. Il est donc intéressant de développer d'autres porte-greffe pour permettre de diversifier les variétés d'abricotier cultivées dans cette région.

Résistance aux bio-agresseurs. Les résultats obtenus sur la résistance conférée à l'abricotier par 'Pêcher franc Rubira' vis-à-vis du chancre bactérien, dû à *Pseudomonas* spp., sont prometteurs et laissent supposer que d'autres progrès seront possibles dans l'avenir. Des maladies qui sont apparues ou se sont développées depuis les années 1980, telles que celles causées par *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*, ou *Monilinia fructicola*, pour ne citer que les plus récentes, posent de réels problèmes phytosanitaires.

Qualité du fruit. Il apparaît de plus en plus clairement que le porte-greffe a une influence sur le calibre, la coloration et les qualités gustatives et technologiques du fruit.

Techniques à développer

Il reste beaucoup à faire sur l'exploration, la gestion et l'évaluation des ressources génétiques, qui sont considérables dans le genre *Prunus*. Il faudrait

aussi étudier le déterminisme génétique ou l'hérédité pour un certain nombre de caractères intéressants dont les mécanismes physiologiques restent également à élucider. De même, l'usage de la SAM devrait se généraliser notamment pour cumuler des gènes de résistances (nématodes) ou pour aider à la sélection pour des caractères longs et difficiles à évaluer.

Inscription et protection des variétés en France

1953, ouverture du catalogue officiel des espèces et variétés arbres fruitiers.

En 2003, 60 variétés porte-greffe de *Prunus* étaient inscrites sur le catalogue officiel français. Dans les essais de caractérisation variétale conduits par l'INRA pour le compte du CTPS, du CPOV ou de l'OCVV, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. À l'issue de deux années d'examen (test DHS), au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée des arbres de référence maintenus en collection, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Il existe un système de certification pour garantir l'authenticité variétale et l'état sanitaire des scions (ou plants greffés). C'est le Ctifl qui en a la responsabilité par délégation du ministère chargé de l'Agriculture. L'inscription au catalogue officiel est obligatoire pour que la variété puisse entrer dans le système de certification. La production de porte-greffe certifiés sans virus (*virus-free*) représentait 27,2 tonnes de semences, 1,8 million de plants issus de semis et 1,4 million de boutures et plants issus de culture *in vitro* (estimation 2004-2005) avec 58 variétés de porte-greffe concernées ; ceci correspond à une part très importante de l'ensemble de la production de porte-greffe. La certification des plants d'espèces fruitières a été un élément clé de la progression de la qualité des plants fruitiers en France. Celle-ci a été pionnière dans ce domaine avec une qualité largement reconnue en Europe, ce qui a favorisé l'exportation des plants fruitiers.

Pour en savoir plus

Bernhard R. et Grasselly C., 1981. Analyse du mode d'action de porte-greffe vigoureux : cas des hybrides amandier × pêcher, porte-greffe du pêcher. *Ann. Amélior. Plant.*, 25, 3, 321-336.

Claverie J., 1996. New selections and approaches for the development of cherry rootstocks in France. *Acta Hortic.*, 410, 373-375.

Dirlewanger E., Kleinhentz M., Voisin R., Claverie J., Lecouls A.C., Esmenjaud D., Poëssel J.-L., Faurobert M., Arùs P., Gomez-Aparisi J., Xiloyannis C. et Di Vito M. E., 2002. Breeding for a new generation of *Prunus* rootstocks : an example of MAS. *Acta Hortic.*, 658, 581-590.

- Dosba F. et Lespinasse Y.**, 2002. 40 ans de progrès en sélection chez les arbres fruitiers. *Sél. Fr.*, 53, 115-126.
- Ermel F.F., Catesson A.-M. et Poëssel J.-L.**, 1995. Early histological diagnosis of apricot/peach × almond graft incompatibility : statistical analysis of data from 5-month-old grafts. *Acta Hortic.*, 384, 497-503.
- Grassely C.**, 1988. Les porte-greffe du pêcher, du plus ancien aux plus récents. *Arboric. Fruit.*, 409, 29-34.
- Lecouls A.-C., Rubio-Cabetas M.-J., Minot J.C., Voisin R., Bonnet A., Salesses G., Dirlewanger E. et Esmenjaud D.**, 1999. RAPD and SCAR markers linked to the Ma1 root-knot nematode resistance in myrobalan plum (*Prunus cerasifera* Ehr.). *Theor. Appl. Genet.*, 99, 1/2, 328-335.
- Poëssel J.-L., Faurobert M. et Ermel-Fontaine F.**, 2001. *Les incompatibilités de greffe chez les arbres fruitiers*. Colloque INRA de la Sainte Catherine, Orléans, 112-123.
- Poëssel J.L., Faurobert M., Esmenjaud D., Dirlewanger E., Gurrieri F., Lemoine M.-C., Lafond S. et Michelot P.**, 2001. Breeding for compatible apricot rootstocks cumulating resistance to Plum pox virus and root-knot nematodes : the *Prunus* × *dasycarpa* way. *12th International Symposium on Apricot Culture and Decline*, Avignon, 10-14 September 2001.
- Renaud R., Bernhard R., Grassely C. et Dosba F.**, 1988. Diploid plum × peach hybrid rootstocks for stone fruit trees. *Hortscience*, 23, 115-117.
- Salesses G.**, 1970. Études cytologiques chez les *Prunus*. I. Espèces de la section *Euprunus*. *Ann. Amélior. Plant.*, 20, 469-483.
- Salesses G.**, 1973. Études cytologiques chez les *Prunus*. II. Hybrides interspécifiques impliquant *P. cerasifera*, *P. spinosa*, *P. domestica* et *P. insititia*. *Ann. Amélior. Plant.*, 23, 145-161.
- Salesses G. et Bonnet A.**, 1994. Cytological studies of tetra-, hepta- and octoploid interspecific hybrids between *P. cerasifera*, *P. spinosa* and *P. domestica*. *Acta Hortic.*, 359, 26-32.
- Salesses G., Dirlewanger E., Bonnet A., Lecouls A.-C. et Esmenjaud D.**, 1998. Interspecific hybridization and rootstock breeding for peach. *Acta Hortic.*, 465, 209-218.
- Salesses G., Grassely C., Renaud R. et Claverie J.**, 1992. Les porte-greffe des espèces fruitières à noyau du genre *Prunus*. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 605-619.

Le *Pyracantha*

Pyracantha spp. M. Roemer ($2n = 2x = 34$)
(Rosacées)

Présentation du genre

C'est en 1847 que le genre *Pyracantha* M. Roemer a été reconnu comme un genre nouveau. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle qu'il a été définitivement adopté. L'origine de ce genre est essentiellement chinoise, exception faite de l'espèce *P. coccinea* M. Roemer, originaire du Caucase. Le développement de cette culture a suivi l'introduction en Europe et aux États-Unis des espèces asiatiques. La première espèce, *P. crenulata* (D. Don) Roemer, a gagné l'Europe en 1844. Il a fallu attendre le début du XX^e siècle pour que les cinq autres espèces de *Pyracantha* soient introduites. À l'origine, les espèces ont été diffusées par semis. Ultérieurement, la multiplication végétative a permis de fixer quelques génotypes intéressants découverts par hasard.

Les différentes espèces du genre *Pyracantha* sont pérennes, autofertiles et diploïdes. Parmi elles, *P. coccinea* est la plus répandue et connue sous le nom de buisson ardent. Les variétés cultivées sont multipliées végétativement par boutures. La dissémination par les semences est très facile. Le genre *Pyracantha* ne s'hybride pas avec les genres qui lui sont le plus proches (*Crataegus* L., genre de l'aubépine, *Pyrus* L., celui du poirier, *Malus* P. Mill., celui du pommier,...).

La diversité génétique du genre n'a pas été analysée. Des marqueurs biochimiques (isozymes) permettent de caractériser les clones (espèces et variétés) en collection. Le groupe des *P. coccinea* se distingue des espèces asiatiques.

Production et utilisation

Les *Pyracantha* sont des arbustes ornementaux épineux présentant des rameaux très courts et fortement lignifiés, dont le fruit très coloré, du jaune soufre au rouge carminé, et brillant, a un très bel effet en arrière-saison. Celui-ci est aussi très apprécié par les oiseaux en hiver. Les *Pyracantha* sont utilisés comme arbustes d'ornement dans les jardins particuliers et les espaces verts en plantes isolées, en

haie séparative ou en massif. Ils sont aussi parfois palissés sur un treillage, contre un mur. Ce sont des plantes à croissance rapide qui s'accommodent de conditions diverses de sol.

Ils sont, en général, commercialisés en conteneurs de diverses capacités, sous forme de plante entière. Aucune donnée ne permet de quantifier la production nationale, mais on peut l'évaluer grossièrement à quelques centaines de milliers d'exemplaires par an.

Avant l'arrivée du feu bactérien en France, c'est-à-dire avant 1972, le *Pyracantha* représentait le quart de la production du marché de la pépinière ornementale française. Des mesures d'interdiction de multiplication, de plantation et de commercialisation (par arrêtés du ministère de l'Agriculture et de la Forêt relatifs à la lutte contre le feu bactérien) concernant certaines espèces et variétés de *Pyracantha*, ont été prises et ont conduit à l'effondrement total du marché. Le programme de sélection mis en place avec le concours de la profession (GIE-Saphyr) a permis, depuis, la sortie d'une gamme de variétés résistantes qui ont été autorisées en culture. Le marché des *Pyracantha* a repris très rapidement pour se stabiliser ensuite.

Histoire des variétés cultivées en France

1874, *Pyracantha coccinea* var. *lalandii* Dipp. (sélection du pépiniériste Lalande, France), variété botanique sélectionnée à Nantes (Loire-Atlantique) et développée sous forme de clone. Elle est vigoureuse et résistante au froid mais très sensible à la tavelure.

1930, *P.* × 'Orange Glow' (semis de hasard découvert dans le jardin du Dr Banga, Pays-Bas), variété clone vigoureuse, très fructifère, peu sensible à la tavelure, mais sensible au feu bactérien.

1947, *P. moretti* Hort. ou *P. coccinea* 'Moretti' (semis de hasard découvert par les pépinières Moret à Lyon, Rhône), variété diffusée sous forme de clone. Elle est fructifère mais sa vigueur est moyenne et elle est très sensible aux maladies.

1965, *P.* × 'Renolex' (variété découverte à Marmande (Lot-et-Garonne) par un pépiniériste de la Mayenne, J. Renault), variété clone à port retombant.

Années 1970, 'Apache', 'Pueblo', 'Shawnee', 'Mohave' et 'Navaho' (US National Arboretum, Washington DC, États-Unis), variétés clones, sélectionnées aux États-Unis. Certaines sont peu rustiques et très sensibles aux maladies.

Années 1980, 'Interrada' (sélection faite dans un semis de graines introduites des États-Unis à la pépinière Darthuizer, Pays-Bas), variété résistante au feu bactérien et à la tavelure, mais dont la fructification est faible avec une tendance à l'alternance.

1985, 'Cadrou', 'Cadange' et 'Cadaune' (INRA, France), variétés clones dans la gamme de couleurs rouge, orange et jaune respectivement, se caractérisant par le cumul d'une bonne résistance à la tavelure avec une très faible sensibilité

au feu bactérien et une fructification régulière et abondante. Ces variétés sont commercialisées sous la marque Saphyr® Rouge, Saphyr® Jaune et Saphyr® Orange, respectivement.

Remarque. Le genre *Pyracantha* est exotique. La sélection faite en Europe et aux États-Unis a permis l'expression de la variabilité intrinsèque.

Regard sur 50 ans de sélection

Des programmes de création variétale ont été entrepris aux États-Unis dans les années 1960, aux Pays-Bas en 1975 et en France en 1982. Un progrès certain a été accompli en combinant les caractères de résistance à la tavelure, de très faible sensibilité au feu bactérien et de rusticité. Ainsi, en France, le programme de sélection, mis en place par l'INRA avec le concours de la profession (GIE-Saphyr), a permis la sortie d'une gamme de variétés résistantes. Actuellement, ces programmes sont achevés et ce genre ne fait plus l'objet de programmes de recherche en France.

Caractères importants améliorés

Résistance aux maladies. Les variétés très sensibles sont régulièrement attaquées et le développement des symptômes sur la feuille, l'inflorescence et le fruit déprécie grandement leur aspect ornemental.

Tavelure. Cette maladie est provoquée par un champignon (*Spilocaea pyracanthae* (Otth.) Rostrup) très mal connu et distinct des tavelures du pommier et du poirier.

Feu bactérien. Cette maladie, provoquée par une bactérie (*Erwinia amylovora* (Burr.) Winsl. *et al.*), reste assez mal connue malgré l'ancienneté de sa découverte et les nombreux travaux qui lui ont été consacrés. La résistance est un caractère à hérédité quantitative (*cf.* encadré p. 656).

La stratégie d'amélioration de l'INRA pour la résistance à ces deux bio-agresseurs, a consisté à réaliser de nombreux croisements en privilégiant ceux impliquant des variétés sélectionnées aux États-Unis et montrant un bon niveau de résistance au feu bactérien. Des pressions de sélection ont été successivement réalisées pour la résistance à la tavelure, au stade jeune semis, puis au feu bactérien au champ sur plantes jeunes et adultes. Les hybrides présélectionnés ont été clonés et leur résistance au feu bactérien confirmée par des essais en serre.

Rusticité. La rusticité est un caractère important pour l'exportation vers les pays de l'Europe du Nord. Les hybrides présélectionnés pour leurs résistances aux maladies ont subi, en pleine terre des hivers rigoureux (– 15 à – 18 °C), ce qui a permis de ne retenir que ceux exprimant un potentiel de rusticité suffisamment élevé.

Valeur ornementale. Le fruit qui constitue l'attrait ornemental principal doit persister le plus longtemps possible. La coloration commence entre le 15 août et le 15 octobre, la persistance de la fructification varie de 3 à 5 mois. Celle-ci est liée à 3 facteurs : la résistance à la tavelure, la vitesse de bletissement du fruit et le niveau d'appétence de celui-ci pour les oiseaux. Les arbustes présélectionnés pour leur résistance aux maladies et au froid sont également sélectionnés sur la couleur et la durée de persistance des fruits.

Feu bactérien et *Pyracantha*

Les attaques de feu bactérien, provoquées par la bactérie *Erwinia amylovora*, se traduisent par la nécrose des tissus infectés susceptibles de conduire à la mort des arbres qui en sont victimes. La bactérie est inféodée à la sous-famille des Maloïdées, une des subdivisions de la famille des Rosacées. Les espèces importantes qui la constituent sont le pommier, le poirier, l'aubépine, le sorbier *Sorbus* L. *Cotoneaster* Medik., *Pyracantha*, le cognassier *Cydonia oblonga* Mill. et le néflier *Mespilus germanica* L. Les premières attaques ont été observées aux États-Unis à la fin du XVIII^e siècle et, historiquement, c'est la première maladie dont on ait pu prouver l'origine bactérienne. Plus près de nous, des foyers ont été découverts en 1957 dans le Kent (Royaume-Uni) et dans des haies d'aubépine près de Dunkerque (Nord) en 1972. Les mesures d'éradication ayant échoué, des mesures réglementaires ont été prises pour tenter de limiter la progression de la maladie. Mais, progressivement, d'année en année, de nouveaux foyers ont été mis en évidence dans les vergers ou dans les cultures d'espèces d'ornement. En plus des interdictions mises en place sous l'égide du Service de la protection des végétaux, une lettre circulaire adressée aux collectivités territoriales et préconisant de ne planter en espace vert aucune espèce hôte de la bactérie, a conduit à l'effondrement quasi complet du marché de l'aubépine, du sorbier, du *Cotoneaster* et du *Pyracantha* entre autres. En 1982, des producteurs de la pépinière d'ornement ont constitué le GIE Saphyr et passé un contrat avec l'INRA d'Angers (Maine-et-Loire) pour mettre au point des variétés de *Pyracantha* résistantes à la tavelure et au feu bactérien. À l'aide d'un plan de croisements faisant intervenir des géniteurs peu sensibles à l'une ou l'autre des maladies, des géniteurs de bonne valeur ornementale et des géniteurs de rusticité ont été sélectionnés.

Les jeunes semis ont été testés sous serre à l'INRA d'Angers pour la résistance à la tavelure. Le matériel survivant a été transporté en zone contaminée (à Dax, Landes) pour subir les tests de résistance au feu bactérien, sur jeunes plantes cultivées en pot avant plantation, puis sur plantes cultivées en pleine terre pendant quatre ans. À l'issue de ces inoculations, une première vague d'hybrides a été choisie sur la base de la résistance observée ainsi que sur des critères de valeur ornementale (abondance de fruits en particulier). Les hybrides ont été clonés, puis introduits en serre à Angers pour y subir des tests de résistance complémentaires faisant intervenir un isolat d'origine nord-américaine qui ne pouvait être employé hors enceinte de confinement. Ces tests ont globalement confirmé le choix des présélections et mis en évidence, comparativement à des témoins, la bonne valeur de certaines d'entre elles. Les clones, débarrassés de l'agent pathogène, ont été plantés pour vérifier leur valeur ornementale. C'est ainsi que les deux premières variétés de la gamme Saphyr® ont été proposées pour la commercialisation. Entre temps, le feu bactérien avait gagné une très grande partie du territoire et des mesures d'assouplissement avaient été prises en faveur des variétés dont le bon niveau de résistance avait été prouvé, tant chez les espèces fruitières que chez les espèces ornementales.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Un mutant à feuillage panaché de la variété 'Cadrou' a été obtenu récemment ('Cadvar' Saphyr® Panache) .
Mutagenèse induite	AUCUNE
Croisements interspécifiques	OUI De nombreux croisements interspécifiques ont été réalisés dans le genre <i>Pyracantha</i> dans le but d'allier la résistance à la tavelure à celle du feu bactérien (gamme Saphyr®).
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	AUCUNE
Transgène	AUCUNE
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI La multiplication végétative horticole par bouturage est utilisée pour propager les variétés.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	AUCUNE
MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Des hybridations entre clones sont réalisées. Une sélection dans la descendance est effectuée. Les hybrides les plus intéressants sont clonés.
Types variétaux	Variété clone

Perspectives d'amélioration

Actuellement, plus aucun pays ne poursuit la sélection de variétés de *Pyracantha*.

Caractères à améliorer

Résistance au froid. Si l'amélioration du *Pyracantha* devait se poursuivre, il faudrait améliorer la résistance au froid.

Valeur ornementale et diversification. Le genre *Pyracantha* a été peu amélioré et la variabilité est très élevée. La réalisation de croisements permettrait de créer encore de nombreuses variétés.

Réduction de l'agressivité. Le *Pyracantha* est banni de certains sites (écoles) en raison de ses rameaux épineux. Un mutant dépourvu d'épine a été trouvé à Angers, il est malheureusement stérile et légèrement sensible au feu bactérien. Il ne peut donc être cultivé en l'état, mais il pourrait être intégré dans un programme d'hybridation.

Protection des variétés en France

Il n'existe pas de catalogue officiel pour les espèces ornementales. Une vingtaine de variétés sont commercialisées dans le monde et seules les co-obtentions INRA-Saphyr sont protégées par COV et marques déposées.

Une collection de référence, pour les examens techniques nécessaires à la délivrance de COV pour l'Union européenne, est gérée par l'Institut national d'horticulture (INH) à Angers. Elle comporte environ 50 clones très représentatifs de la variabilité naturelle et des variétés cultivées.

Pour en savoir plus

- Bertrand H., Cadic A. et Belin J.**, 1992. *Pyracantha*. Origine, description et clé de détermination des principaux taxons. *PHM Rev. Hortic.*, Repères techniques, 101 p.
- Bouma S.**, 1990. Breeding woody ornamentals for fire blight resistance. *Acta Hortic.*, 273, 327-334.
- Cadic A.**, 1984. *Pyracantha* breeding programme in France : first results. *Acta Hortic.*, 151, 307-313.
- Cadic A., Paulin J.-P. et Belin J.**, 1990. New *Pyracantha* resistant to scab [*Spilocaea pyracanthae* (Orth.) Rostrup] and to fire blight [*Erwinia amylovora* (Burr.) Winsl. et al.]. *Acta Hortic.*, 273, 303-309.
- Cadic A.**, 1992. Le *Pyracantha*. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 549-559.
- Cadic A.**, 2005. Domestication et amélioration pour un élargissement de la gamme des espèces ligneuses d'ornement. *Sél. Fr.*, 55, 13-22.
- Decourtye L. et Cadic A.**, 1993. Sélection de *Pyracantha* à hautes performances. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 79 (3), 67-75.
- Meunissier A.**, 1925. Les *Pyracantha* ou « Buisson ardent ». *Rev. Hortic.*, 572-574.
- Moinard E.**, 1992. *Pyracantha*. Dans : *Le Bon Jardinier*. Éditions La Maison rustique, Paris 153^e édition, tome 3, 2362-2363.

Les ray-grass

Lolium spp. ($2n = 2x = 14$ ou $2n = 4x = 28$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation des espèces

Le centre d'origine des ray-grass est probablement la zone moyen-orientale du Croissant fertile. Le ray-grass anglais (*Lolium perenne* L.) est la première graminée fourragère à avoir été domestiquée. Cela s'est passé au XVII^e siècle, en Angleterre, avec le développement des rotations culturales, faisant alterner sur une même parcelle une culture de céréale et une production fourragère (*ley-farming*). Plus récemment, des millions d'hectares de pâturage de ray-grass ont été installés aux dépens de la forêt en Nouvelle-Zélande, pour développer l'élevage du mouton. Les premiers programmes de sélection ont été développés au Royaume-Uni à partir de 1919. Ils n'ont débuté que dans les années suivant la seconde guerre mondiale dans les autres pays, dont la France. Le ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.) est l'une des plantes fourragères les plus anciennement cultivées et donc sélectionnées sous forme de variétés de pays, qui ait fait l'objet de productions et de transactions en France et en Lombardie (Italie) dès le XVIII^e siècle. Le ray-grass hybride (*Lolium* × *boucheanum* Kunth) est une espèce nouvellement créée : elle est le résultat de l'hybridation du ray-grass anglais et du ray-grass d'Italie.

Ces trois ray-grass sont des espèces allogames et anémophiles, multipliées par semences. Le ray-grass d'Italie est annuel (type alternatif) ou bisannuel (type non alternatif). Les ray-grass anglais et hybride sont pérennes. Des plantes de ray-grass anglais cultivé peuvent polliniser des populations naturelles et inversement. L'utilisation intensive de ray-grass anglais dans l'ouest de la France a conduit à une pollution des populations naturelles sauvages, provoquant sans doute ainsi une petite érosion génétique. Certains souhaiteraient que les prairies naturelles, comme par exemple les pistes de ski, soient reconstituées avec des graines de populations locales pour limiter les pollutions génétiques. Cette situation est pour l'instant impossible, les semenciers n'ayant le droit de commercialiser que

des variétés inscrites au catalogue. Malgré cela, le ray-grass anglais n'est certainement pas menacé de disparaître, car il est très ubiquiste.

La situation est très différente pour le ray-grass d'Italie où la diversité génétique est plus limitée et où il est très difficile de trouver encore des populations réellement naturelles en France, du fait de l'introgression massive de gènes issus des variétés cultivées. Il existe encore des populations naturelles de cette espèce dans les prairies suisses.

De très nombreuses prospections de ray-grass anglais ont été menées en Europe afin d'étudier la diversité génétique de cette espèce. La collection européenne est conservée à la Station d'Aberystwyth (Pays de Galles, Royaume-Uni). La variabilité d'un millier de populations de ray-grass anglais, originaires de l'aire de répartition actuelle de cette espèce, a été évaluée par l'INRA. Ce travail a permis, notamment, d'échantillonner une centaine d'entre elles, qui sont représentatives de la diversité existant en France. Ces populations sont conservées par le GEVES au sein d'une collection située au Magneraud (Charente-Maritime).

Production et utilisation

Le produit récolté est la partie aérienne de la plante, de préférence au stade végétatif.

Ray-grass anglais. Le ray-grass anglais est une plante fourragère appréciée pour sa pérennité, sa résistance au piétinement, sa bonne valeur nutritive et sa facilité d'implantation. Toutes ces qualités font du ray-grass anglais la plante idéale pour la réalisation de pâtures. Le ray-grass anglais peut être utilisé seul ou en association avec d'autres graminées ou des légumineuses fourragères comme le trèfle blanc (*Trifolium repens* L.). Au début des années 1990, entre 100 000 et 200 000 ha de ray-grass anglais étaient implantés, chaque année, en France. Une autre utilisation très importante du ray-grass anglais est la réalisation de gazons avec des variétés issues d'une sélection spécifique pour cet usage. Cette espèce est la plus utilisée en gazon avec environ 70 000 quintaux de semences, soit un tonnage supérieur d'environ 30 % à celui employé en fourrage.

Ray-grass d'Italie. Le ray-grass d'Italie est la plante qui symbolise la culture de l'herbe depuis 40 ans. Cette espèce est appréciée pour son implantation et sa culture faciles, sa productivité exceptionnelle l'année du semis et sa production importante au printemps. Sa faible pérennité (6 mois à 2 ans), sa faible croissance en été et sa fâcheuse tendance à la remontaison (montaison après la fauche), sont les principaux défauts de cette espèce. Le ray-grass d'Italie est surtout utilisé pour l'ensilage, mais peut être aussi utilisé en pâture. Il est quelquefois associé avec le trèfle violet (*Trifolium pratense* L.).

Ray-grass hybride. Le ray-grass hybride est apprécié, comme les autres ray-grass, pour son implantation très rapide et facile. Étant un hybride entre le ray-grass d'Italie et le ray-grass anglais, il présente un comportement intermédiaire.

Il est très productif pendant 2 à 3 ans. Comme ses deux parents, sa tendance à remonter peut poser problème. Certaines variétés de ray-grass hybride, type italien, ont un port dressé, adapté à la récolte mécanique. Elles sont destinées à l'ensilage et à la production de foin. Au contraire, d'autres variétés de ray-grass hybride, type anglais, ont un fort tallage, un port étalé, une montaison plus lente qui les prédestinent à une utilisation en pâture. Cependant, le ray-grass hybride de type intermédiaire est probablement le plus intéressant. Le ray-grass hybride est utilisé seul ou en association avec le trèfle violet.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Les ray-grass se trouvaient autrefois uniquement sous forme de populations naturelles. Ce sont donc ces populations naturelles qui ont fait l'objet de domestication pour devenir des populations ou variétés de pays. Et, c'est à partir de ces variétés de pays qu'ont débuté les premiers programmes de sélection conduisant aux variétés inscrites en France, à partir de la fin des années 1950. Ainsi en ray-grass anglais, les premières variétés telles 'Primevère', 'Trianon' ou 'Bocage' furent sélectionnées à partir de populations de pays. De même en ray-grass d'Italie, la variété population '**Mayenne**' a servi à créer, par sélection massale, 'Rina' et 'Rita' (INRA, France) qui furent parmi les premières variétés françaises de ray-grass d'Italie inscrites au catalogue officiel français.

Variétés de ray-grass anglais

Variétés fourragères

1957, '**Primevère**' (INRA, France), '**Raidor**' (Clause, France) et '**Aberystwyth S.24**' (Welsh Plant Breeding Station, Royaume-Uni), variétés synthétiques (au sens large) diploïdes précoces, à port semi-dressé, qui étaient destinées à la fauche et à la pâture. Elles ont eu un développement limité en raison de la concurrence de variétés danoises ('Verna', 'Lenta', Pajbjerg, Danemark) de même type, et dont les semences étaient très bon marché.

1957, '**Bocage**' (Vilmorin-Andrieux, France), variété diploïde semi-tardive, '**Real**' (Clause, France), '**Trianon**' (INRA, France) de même précocité, '**Perma**' (Cebeco, Pays-Bas), variété tardive et '**Vigor**' (RVP, Belgique) variété très tardive. Ces variétés synthétiques (au sens large) à port prostré, à fort tallage, de bonne résistance aux rouilles (rouille couronnée et rouille noire), marquaient un net progrès. Elles ont connu un grand développement, surtout les deux dernières, aussi bien pour la pâture que pour le gazon.

1965, '**Réveille**' (Van der Have, Pays-Bas), première variété synthétique tétraploïde semi-précoce inscrite en France. Cette variété productive, qui montre une bonne résistance aux maladies, a été un témoin dans les essais CTPS.

1979, **'Citadel'** (Mommersteeg, Pays-Bas), première variété synthétique tétraploïde de précocité intermédiaire, inscrite en France. Cette variété productive, montrant, à l'époque, une bonne résistance à la rouille couronnée, a une bonne pérennité. Elle a été un témoin dans les essais CTPS.

1981, **'Bastion'** (Mommersteeg, Pays-Bas), variété synthétique tétraploïde semi-précoce, qui se distingue par une grande productivité.

1984, **'Belfort'** (Mommersteeg, Pays-Bas), variété synthétique tétraploïde très tardive qui présente une bonne productivité.

1985, **'Fanal'** (Van der Have, Pays-Bas), variété synthétique tétraploïde tardive, qui se caractérise par une grande résistance aux rouilles.

1987, **'Magella'** (Cebeco Seeds, Pays-Bas), variété synthétique diploïde semi-tardive, qui présente une grande pérennité et une bonne productivité.

1990, **'Ohio'** (Green Genetics Holland, Pays-Bas), variété synthétique diploïde tardive, qui se distingue par une grande qualité fourragère induisant une excellente production laitière. Cette variété possède, en outre, une bonne résistance aux rouilles. Son défaut est d'avoir un rendement grainier un peu faible.

1990, **'Herbie'** (Van der Have, Pays-Bas), variété synthétique diploïde tardive, qui se caractérise par une grande pérennité.

1996, **'Clerpin'** (INRA, France), variété synthétique diploïde à 16 constituants. Elle est tardive et se distingue par une excellente vigueur au démarrage (c'est-à-dire lors de la reprise de croissance au printemps) et une très bonne pérennité. Elle est faiblement remontante, résistante au piétinement et bien adaptée au pâturage.

1997, **'Bocage'** (Carneau Frères, France), variété synthétique tétraploïde tardive, caractérisée par une bonne adaptation au pâturage.

1998, **'Gwendal'** (RAGT, France), variété synthétique tardive tétraploïde, qui a une grande résistance aux maladies.

Variétés à gazon

1974, **'Manhattan'** (université Rutgers, États-Unis), variété synthétique diploïde qui est issue de plantes de *Central Park* à New-York (États-Unis). C'est la première variété créée spécifiquement pour le gazon. Elle a constitué un progrès certain, surtout pour la résistance au piétinement, pour la finesse des feuilles et pour la densité de talles, associées à une croissance plus lente.

1979, **'Idole'** (Institut de Recherche Vilmorin, France), première variété synthétique française de type gazon à feuilles fines et à port prostré, ayant un bon tallage et une pousse lente et une résistance aux rouilles nettement supérieure à celle de 'Manhattan'. La faible productivité en semences a été un obstacle au développement de cette variété.

1986, **'Troubadour'** (Van Engelen, Pays-Bas), variété synthétique diploïde, qui se caractérise par une grande pérennité et par la finesse de ses feuilles.

1986, '**Numan**' (Pure Seed Testing, États-Unis), variété synthétique diploïde, qui se distingue par son adaptation aux tontes fréquentes et une tolérance à la rouille couronnée supérieure à celle de 'Manhattan', dont elle est issue.

1991, '**Juventus**' (Green Genetics Holland, Pays-Bas), variété synthétique unique en son genre du fait de sa tétraploïdie.

1992, '**Apollo**' (Seed of Oregon, États-Unis), variété synthétique diploïde destinée au gazon qui se caractérise par la qualité du gazon produit et par une bonne production de semences.

1996, '**Plaisir**' (Semunion Gazon, France), variété synthétique diploïde, qui se distingue par sa résistance au piétinement, sa pérennité et par la finesse de son feuillage. Cette variété a servi à la création de la pelouse du stade de France à Saint-Denis (Seine-Saint-Denis). La capacité grainière de cette variété est, cependant, un peu faible.

2000, '**Brio**' (Semunion Gazon, France), variété synthétique diploïde à 8 composants alliant une bonne valeur en gazon à une production de semences satisfaisante.

2002, '**Cachemire**' (Carneau Frères, France), variété synthétique diploïde très intéressante par sa finesse de feuillage, sa densité et son comportement hivernal.

2004, '**Ragtime**' (R2n, France), variété synthétique diploïde particulièrement performante pour son aspect esthétique, sa tolérance au piétinement, son aptitude à supporter la sécheresse et la chaleur et pour sa pérennité.

Ray-grass d'Italie

1957, '**Rina**' et '**Rita**' (INRA, France), premières variétés synthétiques diploïdes de ray-grass d'Italie inscrites en France. Elles sont issues de la variété population 'Mayenne'. 'Rina' est non alternative (c'est-à-dire qu'elle produit peu de tiges dans les cycles de repousse qui suivent les fauches) et destinée à la culture bisannuelle en semis d'automne (sol nu) ou en semis de printemps (sol nu ou sous couvert). 'Rita' est une variété très alternative pour la production rapide en semis de printemps. 'Rina' est résistante au froid et a été largement multipliée pendant les années 1960-1970, puis elle a été remplacée par 'Tiara'.

1957, '**Tiara**' (Cebeco, Pays-Bas), première variété synthétique dont les semences ont été vendues ébarbées. Elle a connu une bonne et longue carrière commerciale malgré des performances moyennes.

1966, '**Tedis**' (Vilmorin-Andrieux, France), première variété tétraploïde française. Cette variété était très productive en fourrage et en semences, mais sensible aux rouilles.

1975, '**Adret**' (UCOPAC, France), variété synthétique diploïde, de type non alternatif, présentant une assez bonne tolérance à la rouille couronnée.

1976, '**Lipo**' (EFLP, Suisse), une des premières variétés inscrites en France présentant une certaine résistance au flétrissement bactérien dû à *Xanthomonas campestris*. Cette variété synthétique est tétraploïde.

1987, '**Andy**' (Zwaan en de Wiljes, Pays-Bas), variété synthétique, tétraploïde et de type alternatif.

1989, '**Fastyl**' (RAGT, France), variété synthétique diploïde et de type non alternatif, se caractérisant par un bon rendement en ensilage et une assez bonne tolérance aux rouilles.

1995, '**Shoot**' (Limagrain Genetics Fr., France), variété synthétique, diploïde et de type alternatif.

1996, '**Podium**' (Limagrain Genetics Fr., France), variété synthétique diploïde et de type non alternatif. Elle se distingue par un bon rendement et une bonne tolérance aux rouilles. Cette variété présente aussi une excellente qualité fourragère.

Ray-grass hybride

1978, '**Augusta**' (Welsh Plant Breeding Station, Royaume-Uni), une des premières variétés synthétiques de ray-grass hybride à avoir été inscrite en France. Elle est tétraploïde.

1980, '**Dalita**' (L. Daehnfeldt, Danemark), variété synthétique tétraploïde dont le niveau de rendement est nettement supérieur à celui d'*'Augusta*', ce qui lui a valu d'être un témoin CTPS jusqu'en 2000.

1988, '**Texy**' (L. Daehnfeldt, Danemark), variété synthétique tétraploïde, typée ray-grass anglais. Cette variété est très peu remontante.

1996, '**Délicial**' (RAGT, France), variété synthétique tétraploïde, résistante aux maladies (*Xanthomonas campestris* et rouille couronnée), très pérenne et avec un bon rendement, notamment en automne et en seconde année d'exploitation. Cette variété est peu remontante.

Remarque. La création de variétés, par les recombinaisons de sources génétiques souvent très éloignées dont elles sont issues, contribuent à l'augmentation de la diversité disponible. De plus, les travaux de sélection ont permis de créer une nouvelle espèce, le ray-grass hybride. Cependant, parmi toutes les variétés de ray-grass créées, seule une faible proportion est effectivement cultivée. Par exemple, sur plus d'une centaine de variétés de ray-grass anglais disponibles au catalogue, une petite dizaine seulement connaît un succès commercial.

Regard sur 50 ans de sélection

Les variétés fourragères n'ont vraiment commencé à être utilisées en France qu'après la seconde guerre mondiale avec le développement des prairies temporaires et la révolution fourragère. Les premiers travaux de sélection du ray-grass anglais ont été engagés au Royaume-Uni, au Danemark, aux Pays-Bas, de même qu'en France (à l'INRA, dès 1947) où ils ont conduit à la création des premières

variétés de ray-grass anglais telles que ‘Primevère’ et ‘Trianon’, obtenues par l’INRA, et ‘Bocage’ issue des travaux des Établissements Vilmorin. Les travaux sur le ray-grass anglais se sont ensuite poursuivis (interrompus un temps à l’INRA pour reprendre en 1983) dans le cadre d’une collaboration entre l’INRA et l’Association des créateurs de variétés fourragères (ACVF), sous l’égide du ministère de l’Agriculture. Pour les utilisations « gazon », la sélection n’a véritablement débuté que dans les années 1970, mais ne s’est pas interrompue depuis. C’est ainsi que l’arrivée de variétés françaises de ray-grass anglais dans le catalogue officiel gazon s’est faite grâce aux Établissements Vilmorin qui inscrivirent, en 1979, la variété ‘Idole’, spécifique de ces usages non agricoles.

En 50 ans de sélection, si le rendement du ray-grass anglais fourrager n’a pas beaucoup progressé, des améliorations notables ont été obtenues dans la souplesse d’utilisation des prairies (durée entre la date de démarrage au printemps et la date d’épiaison), la résistance aux maladies et la qualité fourragère (ingestibilité et digestibilité). Les variétés sont notamment de plus en plus résistantes à la rouille couronnée.

Dans le domaine de la recherche académique, il convient de signaler que le Japon accomplit d’importants efforts sur le ray-grass d’Italie.

En ce qui concerne les variétés de ray-grass anglais destinées à une utilisation en gazon, le progrès est venu d’abord, puis souvent des États-Unis. Le fait marquant est d’avoir effectivement sélectionné des variétés à gazon, qui requièrent des caractéristiques quelquefois différentes, voire opposées, à celles des variétés fourragères.

Enfin, la sélection du ray-grass hybride, nouvelle espèce, est récente en France.

Caractères importants améliorés

Ray-grass anglais fourrager

Qualité fourragère. Des progrès importants ont été obtenus dans le domaine de l’ingestibilité, de l’appétibilité et de la digestibilité. La digestibilité a été améliorée en créant des variétés avec un rapport tige/feuille diminué. Des variétés moins remontantes ont permis d’améliorer considérablement la qualité fourragère. Les variétés résistantes à la rouille noire et à la rouille couronnée ont aussi une meilleure qualité fourragère, ces maladies occasionnant des baisses sensibles de l’appétibilité. De plus, certaines variétés permettent aux vaches d’avoir une très bonne production laitière. Ces critères attestent des progrès importants réalisés sur la qualité du ray-grass en tant que plante fourragère.

Pérennité et stabilité de la production. Les maladies, la sécheresse ou le froid sont les principales causes de destruction, complète ou partielle, de certaines prairies. Les progrès réalisés sur la résistance à chacun de ces stress ont permis de progresser en pérennité et en stabilité du rendement.

Tétraploïdie. Comparée au niveau diploïde, la tétraploïdie apporte une tolérance aux rouilles légèrement supérieure, une meilleure appétibilité, mais en même temps une moindre résistance à la pâture. Les variétés tétraploïdes ont une teneur en eau plus importante, caractéristique nuisible pour l'ingestibilité et la réalisation de foin et d'ensilage. Environ la moitié des variétés sont tétraploïdes.

Diversité de précocité. Des variétés de précocités très différentes ont été sélectionnées. Les prairies comportant des variétés de ray-grass anglais tardif sont faciles à gérer en système de pâturage, car elles n'épient pas avant juin et ne présentent pas de remontaison. Par contre, les variétés précoces présentent l'avantage d'avoir une utilisation double : fauche et pâture. Le port plus dressé des variétés précoces est un avantage pour la fauche.

Allongement de la durée de végétation. Certaines variétés récentes commencent à croître au printemps, au moins 10 jours plus tôt que les variétés anciennes et continuent de faire de la végétation beaucoup plus longtemps en automne. Ce caractère est primordial car il conditionne la durée de présence des animaux dans les pâtures.

Résistance aux rouilles. La rouille couronnée (causée par *Puccinia coronata*) et la rouille noire (causée par *P. graminis*) sont deux maladies fongiques très graves car susceptibles de réduire drastiquement le rendement, la pérennité, l'appétibilité et la digestibilité.

Capacité grainière. La capacité grainière d'une variété est essentielle pour son développement commercial. Ce critère est donc très important dans les programmes de sélection.

Ray-grass anglais à gazon

La sélection est faite uniquement au niveau diploïde. Des mélanges de gazon « label rouge » de type « ornement », « détente et agrément » et « sport et jeux » existent depuis une dizaine d'années. La qualité de ces types de gazon est parfaitement assurée du fait de leurs compositions (espèces et pourcentages) et des variétés qui y entrent. Ils représentent environ 5 % du marché professionnel et 10 % du marché amateur. De plus, l'existence de ce gazon « haut de gamme » a pour effet de « tirer vers le haut » l'ensemble du marché, si bien que la majorité des mélanges gazon commercialisés en France sont d'une excellente qualité, d'un niveau assez proche de celui des mélanges vendus avec label, du fait que les variétés qui y figurent sont souvent les mêmes ou très proches.

Faible croissance. Lorsque les variétés de ray-grass anglais à gazon ont une croissance plus lente, elles nécessitent d'être tondues moins souvent, permettant ainsi de diminuer le coût d'entretien et de limiter le problème de l'élimination des déchets de tonte. Néanmoins, cette voie est limitée car une trop faible croissance diminue la compétitivité avec les mauvaises herbes, limite la vitesse de regarnissage et la résistance au piétinement.

Résistance au piétinement. Les variétés à gazon ont été sélectionnées pour leur capacité de tallage importante, ce qui leur permet de former un tapis végétal

dense, résistant au piétinement. La résistance au piétinement est aussi étroitement corrélée avec la capacité des variétés à croître en hiver, période où les terrains de sport sont souvent soumis à de rudes traitements. Cette caractéristique permet de limiter les actes de rénovation et de réduire les frais d'entretien.

Résistance aux maladies. Les rouilles couronnée et noire sont des maladies très nuisibles pour la pérennité et l'aspect esthétique d'une pelouse. Des variétés résistantes ont été sélectionnées. Par contre, les progrès semblent difficiles à acquérir pour la maladie du fil rouge causée par un champignon (*Corticium fuciforme*) dont le développement et l'impact négatif peuvent toutefois être limités par un entretien suivi.

Économie en intrants. Certaines variétés actuelles sont plus économes en intrants, ce qui a des effets bénéfiques pour l'environnement et pour la limitation des frais d'entretien.

Aspect esthétique. La finesse des feuilles, la densité du tapis végétal et la pérennité ont été considérablement améliorées, ce qui permet de produire des pelouses beaucoup plus esthétiques et utilisables plus longtemps. Par ailleurs, une variabilité importante de nuances de vert plus ou moins foncé, est maintenant disponible dans la gamme variétale.

Capacité grainière (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Ray-grass d'Italie

Résistance aux maladies. Certaines variétés récentes présentent des résistances sensiblement meilleures aux rouilles (*cf.* ray-grass anglais fourrager) que celles des variétés des années 1950. Des résistances notables ont également été obtenues vis-à-vis de *Xanthomonas campestris*, bactérie pathogène à l'origine du flétrissement bactérien susceptible d'occasionner des pertes de 10 à 40 %. Les premières résistances proviennent de variétés suisses.

Pérennité et stabilité de la production (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Qualité fourragère (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Capacité grainière (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Élévation du niveau de ploïdie. La tétraploïdie a permis de créer des variétés de ray-grass d'Italie plus productives et de résoudre les problèmes des rouilles pendant un certain temps. Les variétés tétraploïdes sont généralement plus résistantes aux maladies et à la verse et plus appétibles. La moitié des variétés de ray-grass d'Italie sont tétraploïdes.

Rendement. Le gain en rendement, pour la production de printemps, entre les variétés des années 1950 et celles d'aujourd'hui, peut être estimé à 10 %.

Ray-grass hybride

Diversification. Le résultat le plus frappant est sans doute d'avoir réussi à créer une grande diversité de variétés, certaines d'un type intermédiaire entièrement nouveau, d'autres adaptées à la pâture et enfin d'autres adaptées à l'ensilage.

Résistance aux maladies. Des progrès considérables ont été obtenus dans la résistance aux maladies telles que les rouilles (*cf.* ray-grass anglais fourrager), le flétrissement bactérien et les virus (le virus de la jaunisse nanisante de l’orge ou *Barley yellow dwarf virus*, BYDV et celui de la mosaïque du ray-grass ou *Rye-grass mosaic virus*, RGMV).

Élévation du niveau de ploïdie. La grande majorité des variétés sont tétraploïdes car la tétraploïdie apporte une plus grande stabilité génétique de l’hybride interspécifique.

Pérennité et stabilité de la production (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Rendement. La productivité des meilleures variétés actuelles est de 20 % supérieure à celle d’‘Augusta’, une des premières variétés créées.

Qualité fourragère (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Techniques à développer

Les outils de biologie moléculaire, comme le marquage de gènes ou la transformation génétique, sont jusqu’à présent peu développés, car l’enjeu économique des plantes fourragères est trop faible pour justifier de tels investissements.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D’INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI à l’étranger ‘Meritra RVP’ est une variété belge de ray-grass d’Italie, obtenue par mutagenèse de la variété ‘Lemtal’ et se caractérisant par un rendement amélioré.
Croisements interspécifiques	OUI Introgression de gènes entre ray-grass. Le ray-grass anglais et le ray-grass d’Italie sont capables de se croiser dans la nature. Des variétés de ray-grass anglais possèdent des gènes de ray-grass d’Italie et <i>vice versa</i> . Ray-grass hybride. Le ray-grass hybride (<i>Lolium</i> × <i>boucheanum</i>) est le résultat de l’hybridation du ray-grass anglais (<i>Lolium perenne</i>) et du ray-grass d’Italie (<i>L. multiflorum</i>). Il peut se croiser avec les deux espèces parentes. Cette espèce a été créée dans le but d’associer la pérennité et la valeur alimentaire du ray-grass anglais avec la vitesse de croissance et de repousse du ray-grass d’Italie. × <i>Festulolium</i> . Le ray-grass d’Italie peut aussi se croiser avec différentes espèces de fétuque donnant naissance à une nouvelle espèce : le × <i>Festulolium</i> (<i>cf.</i> encadré p. 670).

suite...

... suite

Introgression de gènes de fétuque. Certains établissements ont réalisé des croisements interspécifiques entre le ray-grass d'Italie et la fétuque élevée et ont ensuite rétrocroisé les hybrides avec le ray-grass d'Italie. Des variétés très résistantes au froid et adaptées à la culture à faibles intrants ont ainsi été obtenues ('Kenhy' très typé fétuque, 'Lofa' très typé ray-grass).

Hybridation somatique

AUCUNE

Élévation du niveau de ploïdie

OUI

Ray-grass anglais fourrager. À l'heure actuelle, 50 % des variétés sont tétraploïdes ('Réveille', 'Fanal', 'Gwendal',...). Celles-ci se distinguent par leur appétibilité, leur digestibilité et leur meilleure tolérance aux maladies. Par contre, les variétés tétraploïdes ont une ingestibilité plus faible et sont plus difficiles à améliorer.

Ray-grass anglais à gazon. Il existe une seule variété tétraploïde de ce type ('Juventus').

Ray-grass d'Italie. La moitié des variétés sont tétraploïdes ('Andy').

Ray-grass hybride. La grande majorité des variétés sont tétraploïdes ('Augusta', 'Taxy',...).

Transgénèse

1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur le ray-grass anglais en 1993. Bien qu'il n'existe pas de variétés de ray-grass transgénique cultivées dans le monde, de nombreux essais au champ ont été réalisés, notamment aux États-Unis.

Caractères améliorés par transgénèse. Les objectifs sont très divers. Ainsi, des ray-grass anglais ont été transformés génétiquement de manière à surproduire une protéine antigel afin de leur permettre de croître toute l'année. Il existe aussi des ray-grass résistants à des herbicides et d'autres tolérants à la sécheresse. La qualité du fourrage étant liée à l'absence d'épiaison, des stratégies ont été développées pour empêcher la floraison. Ces stratégies présentent aussi l'avantage d'inhiber l'émission de pollen et ainsi de limiter les problèmes d'allergie liée au rhume des foin. La biosynthèse des lignines, le métabolisme des sucres, l'efficacité de l'utilisation de l'azote et le contrôle génétique de la floraison sont d'autres thèmes privilégiés.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative

OUI

L'éclatement de touffes est une méthode traditionnelle pour multiplier végétativement des clones intéressants, que ce soit pour le ray-grass anglais, le ray-grass d'Italie ou le ray-grass hybride.

ESSAIS de culture *in vitro*

Ray-grass anglais. Des sommes énormes ont été investies dans la multiplication *in vitro* du ray-grass. Le fait que cette technique ne donne pas de résultats avec tous les génotypes limite beaucoup son usage.

Ray-grass d'Italie. La multiplication végétative *in vitro* est difficile et, pratiquement, elle n'est pas utilisée.

Sélection sanitaire

OUI

(cf. encadré p. 672).

Haploïdisation

ESSAIS

Ray-grass d'Italie. La culture d'anthers *in vitro* donne d'assez bons résultats, mais elle n'est pas utilisée en création variétale.

suite...

... suite

Ray-grass anglais. La culture d'anthères *in vitro* est une méthode très efficace pour produire des plantes haploïdes chez cette espèce. Malheureusement, un problème de stérilité des plantes haploïdes doublées obtenues limite son utilisation pratique.

Recours à la stérilité mâle	ESSAIS Une source de stérilité mâle a été utilisée il y a 20 ans aux Pays-Bas. Elle s'est avérée complexe à mettre en œuvre et le coût pour produire des semences hybrides était trop élevé.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Les ray-grass possèdent un système d'auto-incompatibilité contrôlé par 2 loci multi-alléliques.
Marquage moléculaire	OUI, surtout le ray-grass anglais. Des marqueurs iso-enzymatiques ont été largement utilisés dans des analyses de diversité et en génétique des populations. Des marqueurs AFLP ont été utilisés pour établir une des premières cartes génétiques du ray-grass anglais. Ils sont employés pour faire de la prédiction d'hétérosis et de l'identification variétale. Des marqueurs moléculaires de gènes de résistance à la rouille couronnée sont déjà disponibles. Des QTL de longueur de feuilles et de teneur en sucres solubles ont été identifiés tandis que des QTL pour la productivité sont recherchés. Aucune variété n'est cependant encore issue d'une véritable sélection assistée par marqueurs.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Une sélection récurrente combinée (familiale et individuelle) est réalisée à partir de populations naturelles à base large. Des variétés synthétiques de clones ou de leurs descendances sont créées à partir de polycross de quelques constituants. La sélection est multilocale et multicaractères.
Types variétaux	Population ou variété de pays Variété synthétique ESSAIS Variété hybride. Il existe une hétérosis importante en ce qui concerne le rendement pour l'ensemble des ray-grass. L'absence de mécanismes permettant de maîtriser la fécondation croisée rend inaccessible cette structure variétale.

Le x *Festulolium* Asch. & Graebner

D'une façon générale, un x *Festulolium* peut être défini comme un hybride entre une espèce de fétuque et une espèce de ray-grass. De nombreux travaux ont consisté à croiser une fétuque élevée *Festuca arundinacea* Schreb. avec un ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum*). Les hybrides obtenus possèdent des caractéristiques intermédiaires entre les deux. Le x *Festulolium* est porteur d'une image de plante innovante et correspond assez bien à l'idéotype que les éleveurs se font d'une espèce fourragère. Cependant, le positionnement du x *Festulolium* dans l'ensemble des espèces fourragères n'est pas encore bien établi et, à l'heure actuelle, une seule variété de cette nouvelle espèce a été inscrite comme telle dans le catalogue officiel français.

Perspectives d'amélioration

La diversité génétique au sein des ray-grass est très importante et encore très sous-exploitée, ce qui devrait permettre de réaliser encore des progrès génétiques appréciables. En France, le ray-grass anglais est l'espèce la plus utilisée pour les usages « gazons ».

La crise de l'encéphalite spongiforme bovine (ESB), qui a fortement ébranlé le monde de l'élevage, a surtout mis en évidence l'intérêt d'un élevage reposant sur le pâturage, ce qui est plutôt positif pour le ray-grass anglais (et éventuellement le ray-grass hybride). Ainsi, le volume annuel des ventes de semences de ray-grass anglais (qui cumule les semences destinées aux usages « gazons et fourrager ») est passé de 90 000 quintaux en 1985 à 153 000 q en 2004 tandis que le niveau d'autosuffisance de la production de semences en France, est passé de 3 % en 1982 à 61 % en 2004.

Ray-grass anglais fourrager

Création de variétés adaptées au pâturage. Cela nécessite un allongement de la pérennité et la recherche de plantes avec une morphologie adaptée (rapport limbe/gaine élevé, tallage élevé, etc.). Deux stratégies peuvent être envisagées : le croisement interspécifique avec la fétuque élevée permet d'augmenter la pérennité tandis que la sélection assistée par marqueurs devrait permettre d'accroître les progrès sur les critères morphogénétiques.

Amélioration de la qualité fourragère. La teneur en protéines, la teneur en matière sèche et la digestibilité doivent être améliorées. Jusqu'à maintenant, ces caractères ont pu être travaillés grâce à l'utilisation de méthodes pratiquées au laboratoire à l'aide d'un infra-analyseur (d'absorption du rayonnement proche infra rouge). L'idée est de transférer ces méthodes du laboratoire au champ pour avoir des résultats immédiats. Ceci permettrait de systématiser les analyses et d'accroître le progrès pour ces caractères. On notera le travail remarquable conduit au Royaume-Uni, qui a permis de créer des variétés ayant une teneur plus élevée en sucres solubles, d'où une valeur énergétique et une « ensilabilité » accrues.

Résistances aux maladies. Il est nécessaire de continuer à rechercher des résistances à la rouille couronnée car le parasite semble évoluer. Il pourrait aussi être intéressant de développer des variétés résistantes à l'helminthosporiose (causée par *Helminthosporium siccans* et *H. dictyoides*) afin de pouvoir conquérir les marchés de l'Europe du Nord.

Endophytes. Les endophytes sont des champignons qui vivent en symbiose avec certaines graminées. Cette symbiose induit des effets positifs et négatifs, dont le bilan global est controversé (cf. encadré p. 672).

Réduction des problèmes d'allergie. Le pollen du ray-grass est allergène et en partie responsable du rhume des foins. Des essais, par transgénèse, pour réaliser des variétés ne produisant pas de pollen sont en cours.

Les endophytes

Les endophytes sont des champignons qui vivent en symbiose avec certaines graminées. Ils se transmettent par la semence et leur développement dépend beaucoup des conditions environnementales. Environ 75 % des populations naturelles françaises de ray-grass anglais contiennent un endophyte (*Neotyphodium lolii*), mais à des taux très bas. En Nouvelle-Zélande, aux États-Unis et en Chine, les variétés sont volontairement inoculées avec un endophyte, car les variétés endophytées sont les seules qui résistent à certains insectes. Les endophytes produisent, en effet, un insecticide : la péramine. Dans ces pays, les endophytes confèrent aussi une meilleure capacité à produire les semences et une meilleure rusticité. Les effets bénéfiques des endophytes sur la plante n'ont pas pu être mis en évidence en France de façon systématique. De plus, la plupart des endophytes produisent des toxines (lolitrème B et ergovaline) dangereuses pour les herbivores, car induisant des symptômes proches de ceux occasionnés par une maladie du mouton : la tremblante. En France, des résidus de paille, issus de production de semences ou de la tonte de variétés à gazon endophytées ont provoqué ces effets sur des chevaux. Ces champignons endophytes peuvent être détruits par thermothérapie, en chauffant les semences à 50 °C. En Nouvelle-Zélande, des chercheurs travaillent afin de sélectionner des endophytes gardant leur effet protecteur des végétaux, mais ne causant plus de problèmes de toxicité chez les animaux.

Ray-grass anglais à gazon

Pérennité. L'augmentation de la pérennité est conditionnée par l'obtention d'une meilleure résistance aux différents stress biotiques et abiotiques.

Résistance au piétinement. Il est encore possible d'améliorer ce caractère.

Résistance à la maladie du fil rouge. Bien qu'il soit possible de limiter cette maladie par des techniques culturales, elle prend de l'ampleur et il serait important de trouver les méthodes permettant la création de variétés véritablement améliorées pour ce caractère.

Meilleure valorisation de l'azote. Avec les préoccupations environnementales actuelles de la société, cet objectif devient prioritaire.

Ray-grass d'Italie

Développement de variétés de courte durée de vie. Des variétés à durée de vie assez courte (2/3 coupes), mais très productives, auraient sûrement leur utilité tant en France qu'à l'étranger pour constituer des stocks fourragers sur des temps courts ou pour couvrir le sol entre deux cultures.

Réduction de la remontaison. La remontaison nuit grandement à la qualité fourragère du ray-grass d'Italie.

Résistance aux maladies (cf. ray-grass anglais fourrager).

Développement de variétés pour faire du sursemis. La France a 20 ans de retard pour réaliser ce type de variété, qui pourrait intéresser tout le Bassin méditerranéen. Le cynodon (*Cynodon dactylon* L. Pers.) est la graminée idéale

pour faire des pelouses dans ces pays, car le cynodon est très résistant à la sécheresse et reste très vert en été. En hiver, il jaunit, d'où l'intérêt de développer des variétés de ray-grass d'Italie qui pourraient être semées sur les pelouses de cynodon.

Ray-grass hybride

Résistance aux maladies (*cf.* ray-grass anglais fourrager).

Pérennité (*cf.* ray-grass anglais à gazon).

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue plantes fourragères.

1972, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste limitative de variétés d'espèces à gazon d'agrément et de sport.

En 2003, 139 variétés de ray-grass anglais fourrager, 97 variétés de ray-grass anglais à gazon, 33 variétés de ray-grass hybride et 88 variétés de ray-grass d'Italie étaient inscrites au catalogue français (listes A et B) et 498 variétés de ray-grass anglais fourrager, 222 variétés de ray-grass anglais à gazon, 69 variétés de ray-grass hybride et 286 variétés de ray-grass d'Italie au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 3 années. À l'issue de ces 3 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. La section CTPS plantes fourragères et à gazon a fixé des dispositions qui ont pour objectif de contrôler, dans l'appréciation de la VAT, le biais dû à la présence d'endophytes dans les plantes des parcelles d'essais du réseau officiel d'inscription au catalogue pour les espèces de graminées fourragères et à gazon. En attendant la définition d'un protocole officiel de contrôle au laboratoire de la qualité des semences utilisées dans les essais VAT, la section du CTPS demande au déposant une attestation spécifiant que le lot de semences contient plus de 80 % de semences indemnes d'endophytes vivants. La variété est testée pendant 2 ou 3 ans dans un réseau

Les mélanges de variétés fourragères

Jusqu'en 1998, l'Union européenne avait préconisé la commercialisation de semences fourragères sous forme monovariétale. La commercialisation de mélanges était interdite sauf dans les états qui avaient l'habitude de ces produits et qui ont demandé des dérogations. Une directive européenne, adoptée en 1999 a complètement renversé la situation. Les mélanges d'espèces et de variétés à des fins fourragères doivent pouvoir être commercialisés librement dans toute l'Union européenne. La France a bénéficié d'une dérogation jusqu'en février 2004.

Les organisations d'éleveurs, l'interprofession des semences et certains semenciers craignaient que les mélanges fassent perdre la notion de variété, ce qui aurait pu avoir des répercussions négatives sur la valorisation du progrès génétique. Une autre inquiétude, commune au CTPS et aux usagers, était que le contrôle variétal des mélanges est actuellement techniquement difficile. Certains fournisseurs non scrupuleux pourraient alors associer des variétés d'appel avec d'autres, de bien moindre qualité.

Parce que cette dérogation ne serait pas reconduite et que, de plus, les agriculteurs faisaient très souvent des mélanges de manière empirique, il était urgent de développer un programme de recherche pour définir « un bon mélange ». Les agriculteurs bretons, par exemple, associent souvent des variétés de trèfle blanc (*Trifolium repens*) avec deux variétés de ray-grass anglais de même précocité, l'une étant diploïde et l'autre tétraploïde. De même pour la culture industrielle de luzerne (*Medicago sativa* L.) pour la déshydratation, les agriculteurs ont pris l'habitude de mélanger au moins deux variétés. Le nombre de constituants et la proportion optimale entre plantes légumineuses et graminées pour la réalisation d'un mélange n'ont pas été définis. Des pays, tels que la Suisse et les Pays-Bas, ont développé, depuis des années, des pratiques de mélanges fourragers.

La réglementation adoptée en 2004 stipule que les variétés utilisées en mélanges doivent appartenir au catalogue européen des variétés fourragères, et donc avoir été testées pour leur valeur agronomique, que la composition d'un mélange doit être déclarée au GNIS préalablement à la fabrication et être constante en espèces et variétés et enfin que le taux minimal d'incorporation d'un constituant dans un mélange doit être au minimum de 5 % en poids.

national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Les 2 variétés, qui synthétisent le mieux les performances que devrait avoir une variété et qui sont multipliées, constituent les témoins de référence. Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois la variété proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Récemment, le CTPS a également eu un rôle autour des questions de définition du $\times$ *Festulolium* et a contribué à modifier la définition auprès du Comité permanent des semences de la Commission européenne de Bruxelles. Celui-ci a voté, en 2004, la demande française d'élargissement de la notion de $\times$ *Festulolium* : désormais cette dénomination s'applique à toutes les variétés issues d'un croisement entre un ray-grass (de n'importe quelle espèce) et une fétuque

Les mélanges de variétés à gazon

Au niveau européen, il n'y a aucune obligation de tester la valeur culturale des variétés à gazon : un test DHS suffit. La France est le seul pays européen qui impose un test de la valeur d'utilisation pour les variétés à gazon. Un arrêté, déposé en 1983, imposait que les mélanges pour les espaces verts contiennent exclusivement des variétés inscrites au catalogue. Cette mesure garantissait la qualité des variétés françaises à gazon : tous les composants étaient garantis appartenant à des variétés et à des espèces adaptées aux conditions françaises.

En 1998, cet arrêté a été abrogé, à la suite d'une demande de l'Union européenne. Jusqu'à présent, les professionnels de la filière française se sont engagés à continuer d'appliquer les anciennes mesures. Cependant, on pourrait craindre que cet engagement soit caduc si des mélanges « bas de gamme », préparés dans d'autres pays, prenaient des parts de marché importantes. Ceci qui ne semble pas être le cas aujourd'hui.

(de n'importe quelle espèce), alors que précédemment, dans l'Union européenne le terme de *× Festulolium* était réservé aux variétés issues de croisements entre une fétuque des prés (*Festuca pratensis* Huds.) et un ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum*).

Le CTPS a contribué, par ailleurs, à orienter la sélection en favorisant l'inscription de variétés résistantes aux rouilles. Le CTPS a également conduit les réflexions préalables à la définition du cadre réglementant la commercialisation des mélanges de variétés fourragères (cf. encadrés ci-contre et ci-dessus).

Pour en savoir plus

Andersen S.B., Madsen S., Roulund N., Halberg N. et Olesen A., 1997. Haploidy in ryegrass. *In vitro haploid production in higher plants/ Current plant science and biotechnology in agriculture*, 23, 133-147.

Balfourier F., Charmet G., Betin M. et Bourgoin B., 1992. Les ray-grass. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 310-321.

Balfourier F., Charmet G. et Grand-Ravel C., 1993. Diversité et conservation des ressources génétiques dans le genre *Lolium*. *Sauve qui peut !* 4, 11-16.

Bert P.-F., Charmet G., Sourdille P., Hayward M.D. et Balfourier F., 1999. A high-density molecular map for ryegrass (*Lolium perenne*) using AFLP markers. *Theor. Appl. Genet.*, 99 (3/4), 445-452.

Bhalla P.L., Swoboda I. et Singh M.B., 1999. Antisense-mediated silencing of a gene encoding a major ryegrass pollen allergen. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96 (20), 11676-11680.

Bourgoin B., 2002. Point sur l'amélioration génétique des graminées destinées aux usages « gazon ». *Sél. Fr.*, 53, 127-131.

Charmet G. et Balfourier F., 1991. Collecte et évaluation de populations naturelles de ray-grass anglais en France. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 77, 53-64.

Creemers-Molenaar J. et Beerepoot L.J., 1991. In vitro culture and micropropagation of ryegrass (*Lolium* spp.). *Biotechnol. Agric. For.*, 19, 549-575.

Ghesquière M. et Mousset C., 2003. *Festulolium* : définitions et perspectives. *Fourrages*, 176, 479-492.

Giddings G., 2000. Modelling the spread of pollen from *Lolium perenne*. The implications for the release of wind-pollinated transgenics. *Theor. Appl. Genet.*, 100 (6), 971-976.

- Gillet M.**, 1980. Le ray-grass anglais. Dans : *Les graminées fourragères*. Éditions Gauthier-Villars, Paris, 275-278.
- Gillet M.**, 1980. Les ray-grass hybrides. Dans : *Les graminées fourragères*. Éditions Gauthier-Villars, Paris, 290-291.
- Gillet M.**, 1980. Le ray-grass d'Italie. Dans : *Les graminées fourragères*. Éditions Gauthier-Villars, Paris, 255-262.
- GNIS**, 2000. *L'amélioration des plantes fourragères*. Collection « Agriculture et sélection végétale ». Cédérom, Éditions GNIS, Paris.
- Hensgens L.A.M., De Bakker E.P.H.M., van Os-Ruygrok E.P., Rueb S., van de Mark F., van der Maas H.M., van der Veen S., Kooman-Gersmann M., Hart L. et Schilperoort R.A.**, 1993. Transient and stable expression of GUS A fusions with rice genes in rice, barley and perennial ryegrass. *Plant Mol. Biol.*, 22 (6), 1101-1127.
- Huyghe C.**, 2002. 40 ans d'amélioration des espèces fourragères pérennes : acquis et perspectives. *Sél. Fr.*, 53, 41-54.
- Huyghe C.**, 2005. *Prairies et cultures fourragères en France : entre logiques de production et enjeux territoriaux*. INRA Éditions, Paris, 224 p.
- Jones E.S., Mahoney N.L., Hayward M.D., Armstead I.P., Jones J.G., Humphreys M.O., King I.P., Kishida T., Yamada T. et Balfourier F.**, 2002. An enhanced molecular marker based genetic map of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) reveals comparative relationships with other *Poaceae* genomes. *Genome*, 45 (2), 282-295.
- Luciani A.**, 2004. Le ray-grass anglais gazon. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 163-169.
- Mansat P.**, 1964. L'amélioration des ray-grass. *Fourrages*, 20, 56-62.
- Proserpi J.-M., Guy P. et Balfourier F.**, 1995. *Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon*. INRA et BRG Ed., Paris, 219 p.
- RAGT**, 1999. *Le mémento de l'herbe*. Document RAGT, Rodez, 53 p.
- Rebischung J.**, 1961. Le catalogue des espèces fourragères après la parution du décret du 22 janvier 1960. *Ann. Amélior. Plant.*, 11 (3), 387-395.
- Ravel C., Charmet G. et Balfourier F.**, 1995. Influence of the fungal endophyte *Acremonium lolii* on agronomic traits of perennial ryegrass in France. *Grass Forage Sci.*, 50 (1), 75-80.
- Ye X.D., Wu X.L., Zhao H., Frehner M., Nosberger J., Potrykus I. et Spangenberg G.**, 2001. Altered fructan accumulation in transgenic *Lolium multiflorum* plants expressing a *Bacillus subtilis* sacB gene. *Plant Cell Rep.*, 20 (3), 205-212.

Le soja

Glycine max (L.) Merrill ($2n = 2x = 40$)
(Fabacées ou Papilionacées)

Présentation de l'espèce

Le soja, *Glycine max* (L.) Merrill, est originaire du nord-est de la Chine (Mandchourie) et serait issu de la domestication d'une espèce volubile (– 1700 / – 1100 av. J.-C.), connue aujourd'hui sous le nom de *Glycine soja* Sieb & Zucc. Après la domestication, son extension est rapide dans toute l'Asie et le soja atteint le Sud-Est asiatique ainsi que le Népal et l'Inde en 1400/ 1500 de notre ère. Ses graines étant rapidement introduites par les populations dans leur alimentation, cette extension géographique s'accompagne d'une diversification des préparations alimentaires (*miso*, *soy-sauces*, *tempeh*, *tofu*, etc.). Lors de leurs premiers voyages en Asie aux XVI^e et XVII^e siècles, les Européens découvrent les vertus de cette plante et surtout la diversité des préparations culinaires à partir de graines de soja. L'introduction de graines de soja et les premières études agronomiques de cette plante ne commencent qu'un peu plus tard (XVIII^e siècle), en Angleterre à Londres au *Kew Garden*, en France à Paris au Jardin des Plantes et bientôt dans toute l'Europe.

L'acclimatation aux États-Unis se fait simultanément, souvent *via* l'Angleterre. Mais, sa véritable extension ne commence qu'à partir de 1850 avec son arrivée en Illinois. Rapidement, les performances agronomiques de cette plante intéressent les cultivateurs qui, dès 1853, mettent en place une distribution élargie des semences *via* les collèges agricoles. Les propriétés du soja les plus remarquées sont ses performances lorsqu'il est utilisé comme plante fourragère. Pâturé ou bien utilisé en tant que foin, voire comme ensilage, le soja est à cette époque, introduit dans les rations alimentaires des principaux animaux d'élevage (porc, volailles, bovins). À la fin du XIX^e siècle, les premiers travaux de recherches permettent de mieux connaître cette plante et sa physiologie (fixation symbiotique de l'azote, sensibilité à la photopériode, notamment). Des prospections à grande échelle sont alors organisées en Asie et en particulier en Chine, pour identifier les génotypes les mieux adaptés aux différents climats des États-Unis.

À partir des années 1920, la culture du soja s'est rapidement développée aux États-Unis car le cotonnier (*Gossypium* L.), principale plante concurrente pour la fourniture d'huile et de protéines, a alors subi de graves attaques de papillons lépidoptères. Depuis, le puissant lobby du soja a toujours soutenu la culture de cette plante aux États-Unis.

En France, des expérimentations et un programme de sélection ont débuté à la fin du XIX^e siècle. Les variétés qui ont alors été créées, telles que 'Noirs des Frères' ou 'Jaune du Lot-et-Garonne', n'ont été que peu cultivées. Une des raisons majeures de cet échec est liée au fait que le développement de cette culture en métropole s'est heurtée au lobby de production de plantes oléagineuses produites en Afrique, puis en Asie (arachide *Arachis hypogaea* L., palmier à huile *Elaeis guineensis* Jacq.). La France avait alors décidé de favoriser la culture de plantes oléo-protéagineuses dans ses pays coloniaux de l'époque, au détriment du développement du soja en métropole. C'est pourquoi, la France, qui a attendu jusqu'aux années 1965-70, a été un des derniers pays européens à se lancer dans la culture du soja. En 1973, l'embargo des États-Unis à l'encontre de la Communauté européenne, a fait brusquement prendre conscience à cette dernière de sa dépendance pour son approvisionnement en protéines. Des programmes d'amélioration commencèrent alors partout dans le monde, donnant naissance à des variétés hautes, très versantes et demandant un apport hydrique important.

Le soja est une espèce autogame et annuelle multipliée par semences. *Glycine soja* est la seule espèce qui peut se croiser avec le soja. Elle n'est présente qu'en Chine et au Japon. Il n'y a donc aucun risque de pollinisation d'espèces sauvages en France. De plus, le soja est une espèce autogame à fleur cléistogame, ce qui limite considérablement les possibilités de fécondation croisée entre variétés. En effet, dans un champ de soja, le taux d'allogamie est estimé à moins de 1 %. Enfin, les semences ne se conservent pas longtemps dans le sol (moins d'un an).

La variabilité du soja est très importante. Par exemple, les variétés de soja peuvent être réparties selon 13 groupes de maturité, ce qui dénote une plasticité remarquable en ce qui concerne les exigences photopériodiques et thermopériodiques ; actuellement cette plante est cultivée depuis l'Équateur jusqu'à des latitudes de l'ordre de 60° Nord. Les banques de gènes (11 000 génotypes aux États-Unis, 15 000 génotypes en Chine) contiennent l'essentiel de la diversité mondiale. Cependant, il est probable qu'il y ait eu une certaine perte de matériel génétique. En effet, quelques études de diversité menées essentiellement par les Nord-Américains et les Chinois montrent que le niveau de diversité de *G. soja*, l'ancêtre du soja, est supérieur à celui du soja cultivé. Par contre, toute cette biodiversité n'est pas toujours utilisable car elle est quelquefois difficile d'accès.

Production et utilisation

Le principal produit récolté est la graine exalbuminée. Les graines sont regroupées par 2 ou 4 dans une gousse.

Le soja est une plante cultivée dans plus de 80 pays. En 2004, les plus grands producteurs de graines de soja étaient les États-Unis (85,5 millions de tonnes), le Brésil (49,2 millions de tonnes), l'Argentine (31,5 millions de tonnes), la Chine (17,6 millions de tonnes), l'Inde (5,5 millions de tonnes). Avec une production de 204 millions de tonnes, c'est la plante oléagineuse la plus cultivée au monde. En France, le soja était cultivé sur 59 000 ha pour une production de 148 000 tonnes en 2004 (données FAO).

La graine de soja contient 20 % d'huile et 40 % de protéines, ce qui explique ses multiples utilisations.

Alimentation humaine. Le soja peut être consommé sous forme de margarine et d'huile convenant aussi bien pour les préparations crues que cuites (après raffinage de l'huile). Le soja est un composant majoritaire de différentes préparations alimentaires telles que le pâté de soja (*tofu*), préparation mimant les produits carnés et les produits laitiers. Le soja est aussi un composant mineur d'une multitude de produits alimentaires. Par exemple, la lécithine, constituée de phospholipides obtenus durant la transformation de l'huile de soja, est un émulsifiant très couramment utilisé. Par contre, le légume dénommé en France « pousse de soja » ne provient absolument pas de l'espèce *Glycine max*, mais de l'Amérique ou « haricot mungo » (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek).

Alimentation animale. Le produit restant après l'extraction de l'huile, le tourteau, est un aliment très recherché pour la nutrition animale. Il est pauvre en glucides et lipides, mais possède un taux de protéines proche de 50 %. Ses protéines contiennent tous les acides aminés indispensables (mise à part les acides aminés soufrés). L'Union européenne importe de grandes quantités de tourteau de soja. Le soja peut aussi être utilisé en engrais vert, sous forme de foin, d'ensilage (avec du maïs *Zea mays* L. spp. *mays*) ou de grain.

Engrais vert. La valeur fertilisante du soja est importante lorsqu'il est enfoui (140 kg d'azote/ha).

Industrie. L'huile de soja sert aussi à la fabrication de très nombreux produits industriels non alimentaires, notamment en savonnerie et en stéarinerie.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Les variétés introduites en France, jusque dans les années 1920, étaient en fait très souvent des mélanges de différents génotypes, eux-mêmes pas toujours fixés génétiquement et venant directement de différents programmes d'amélioration. Ces programmes de sélection étaient réalisés dans différentes stations agronomiques (Europe, Amérique du Nord et Japon) ayant entrepris des évaluations agronomiques sur cette espèce dès la fin du XIX^e siècle à partir d'introductions réalisées au cours des différentes campagnes de collecte en Chine (Mandchourie notamment).

Ces mélanges ont induit à la fois des confusions dans les caractéristiques variétales (une même lignée pouvant avoir des caractéristiques différentes) et de multiples synonymies dans les dénominations variétales. Ainsi, 'Jaune de Mandchourie' a au moins trois dénominations différentes.

Fin du XIX^e siècle, '**Noir des Frères**', variété précoce de taille haute, sensible à la verse. Elle avait un faible rendement, avec un grain noir riche en protéines.

Fin du XIX^e siècle, '**Jaune du Lot-et-Garonne**', variété très précoce de taille réduite, assez sensible à la verse. Elle produisait un grain jaune très riche en protéines, proche de celui des types cultivés actuellement, mais avec un faible rendement.

XIX^e siècle, '**Bitterhof's Gelbe Fruhe**' (Bitterhof Berlin, Allemagne), variété précoce introduite en France dans les années 1920.

Années 1910, '**Hatto jaune**' (Rouest, France), variété semi-précoce, résistante à l'échaudage, sélectionnée en France par M. Rouest, un des précurseurs de l'introduction et de la culture du soja en France. Cette variété a été cultivée en France jusque dans les années 1940.

Années 1920, '**Soja d'Étampes**' à graine jaune et '**Soja hâtif de Podolie**' à graine noire.

Variétés récentes

Les variétés sont classées en fonction de la précocité, du rendement et de la teneur en protéines.

Ce sont toutes des variétés lignées pures.

1974, '**Amsoy 71**' (université d'Indiana, États-Unis), variété nord-américaine présentant une bonne adaptation au climat français.

1977, '**Hodgson**' (université du Minnesota, États-Unis), variété semi-tardive, à croissance indéterminée et adaptée au sud-ouest de la France.

1977, '**Kingsoy**' (Northrup King Semences, France), variété nord-américaine présentant une bonne tolérance au stress hydrique.

1980, '**Weber**' (Iowa Station, États-Unis), variété semi-tardive, à croissance indéterminée et adaptée au Sud-Ouest. Elle est, de plus, productive et résistante à la verse.

1980, '**Maple Arrow**' (université d'Ottawa, Canada), variété canadienne, précoce, productive et ayant permis la culture en Centre-Est. Cette variété a connu un certain succès commercial.

1984, '**Sito**' (KWS, Allemagne), variété allemande, très précoce, permettant une culture dans le nord de la France.

1988, '**Alaric**' (INRA, France), première variété à croissance semi-déterminée (c'est-à-dire que la plante ralentit beaucoup sa croissance (phase végétative) lorsqu'elle commence sa floraison (phase reproductrice)). La plante est courte et résistante à la verse.

1989, '**Léman**' (ORSEM, France / Station de Changins, Suisse), variété très précoce adaptée au Bassin parisien.

1990, '**Spot**' (INRA, France), première variété à croissance déterminée, c'est-à-dire que la plante arrête sa croissance lorsqu'elle commence à fleurir : la phase végétative et la phase reproductrice sont séparées dans le temps.

1991, '**Essor**' (King Grain, Canada), variété très précoce, productive mais avec une faible teneur en protéines.

1992, '**Goldor**' (Rustica Semences, France), variété semi-tardive, adaptée au Sud-Ouest, très productive et résistante à la verse, mais avec une faible teneur en protéines.

1992, '**Paoki**' (Asgrow USA, États-Unis), variété semi-tardive, productive mais avec une faible teneur en protéines.

1992, '**Queen**' (Dekalb Pfizer, États-Unis), variété tardive présentant une bonne résistance à la verse et une bonne tolérance au *Sclerotinia sclerotiorum*. Son rendement et sa teneur en protéines sont moyens.

1992, '**Imari**' (Asgrow USA, États-Unis), variété semi-tardive à tardive, à croissance semi-déterminée, se caractérisant par une teneur élevée en protéines, mais avec une productivité faible.

1993, '**Sapporo**' (Asgrow USA, États-Unis), variété semi-tardive qui constitue une amélioration au niveau du rendement. Elle a, par contre, une faible teneur en protéines (39-40 %). En 2002, elle était au deuxième rang pour la vente de semences.

1995, '**Quito**' (Asgrow-France, France), variété très précoce qui présente une bonne teneur en protéines, mais avec une productivité faible.

1998, '**Orion**' (Station de Changins, Suisse), variété précoce, moyenne pour le rendement et la teneur en protéines.

1999, '**Sepia**' (RAGT, France), variété précoce se caractérisant par une bonne productivité, une bonne teneur en protéines, une bonne résistance à la verse et une grande régularité de rendement.

2000, '**Amphor**' (Rustica Prograin Génétique, France), variété très précoce, se caractérisant par une bonne productivité. Elle connaît actuellement un certain développement en prenant des parts de marché parmi les variétés de ce groupe de précocité.

Remarque. Les bases génétiques des variétés actuelles sont très étroites car ne reposant que sur 10 à 20 génotypes. Ceci a été mis en évidence par une étude menée dans les années 1980 à 1990, dans les deux banques mondiales de gènes (Chine et États-Unis), à partir d'un important travail de collecte et d'évaluation de la diversité génétique. La collecte semble avoir peu profité à l'élargissement de la base génétique pour la création variétale. En France, il faut noter un gain génétique important durant ces quarante dernières années, puisque le soja n'a été sélectionné en France que depuis la fin des années 1960.

Regard sur 50 ans de sélection

Les moyens investis en Europe et en particulier en France pour l'amélioration du soja ont été et sont toujours très réduits. Le lobbysme des entreprises tirant bénéfice des produits coloniaux ainsi que l'éparpillement des moyens que l'Europe a consacrés à l'amélioration de nombreuses espèces protéagineuses (soja, mais aussi lupin *Lupinus* L., féverole *Vicia faba* L., pois *Pisum sativum* L., légumineuses fourragères,...) ont longtemps contribué à l'absence d'une recherche européenne lisible et reconnue en matière de protéagineux. Cette situation a favorisé l'émergence d'un seul pôle de recherche important sur le soja : les États-Unis.

En 50 ans, l'importance économique du soja a véritablement explosé : il est passé du statut de plante fourragère / ou de plante à la base du régime alimentaire asiatique au début du siècle au statut de fer de lance de l'intensification agricole et de la politique économique des États-Unis. Cette expansion s'est fondée sur une sélection très active qui s'est appuyée sur une base génétique très étroite. Le rendement a été le principal facteur pris en compte, la qualité n'ayant commencé à être considérée qu'à partir de 1985. Aux États-Unis, la transgénèse a été utilisée pour introduire des caractères tels que la résistance à des herbicides ou la haute teneur en acide oléique.

Caractères importants améliorés

Rendement. L'amélioration quantitative est de 15 à 20 kg/ha/an. Le rendement est aussi plus régulier.

Teneur en protéines. Les variétés modernes ont été considérablement améliorées pour la teneur en protéines et la stabilité de ce caractère.

Résistance à la verse. Ce caractère a aussi bien progressé, notamment grâce à la création de variétés à croissance déterminée ou semi-déterminée.

Adaptation à la culture dans le nord de la France. Les variétés 'Maple Arrow' (1980) et 'Sito' (1984) ont permis, du fait de leur grande précocité, de cultiver le soja respectivement dans le centre-est et le nord de la France.

Qualité de l'huile. L'huile de soja est naturellement riche en acides gras poly-insaturés, ce qui lui confère d'intéressantes propriétés hypocholestérolémiantes. Par contre, cette huile est peu adaptée aux hautes températures car elle s'oxyde. Par conséquent, pour faire de l'huile de friture à partir d'huile de soja, il est nécessaire de la modifier par hydrogénation, ce qui a pour effet néfaste de transformer les acides gras poly-insaturés en acides gras mono-insaturés ou saturés et de générer des acides gras moins bons pour la santé. Pour éviter cette opération industrielle, des variétés contenant plus de 80 % d'acide oléique (au lieu de 23 %) ont été réalisées par transgénèse (cf. encadré p. 684 et 685). L'huile obtenue est ainsi plus apte à être utilisée pour la cuisson. Elle contient, en outre, 10 % d'acides gras saturés, 2 % d'acide linoléique et 3,5 % d'acide α -linoléique.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE Un certain nombre de caractères sont monogéniques comme la forme de la feuille. Cependant, aucune mutation spontanée n'a eu un impact prédominant sur l'amélioration du soja. OUI Les mutants donnant des plantes mâles stériles ont été et sont encore utilisés pour les populations de présélection.
Mutagenèse induite	OUI à l'étranger Dans le monde, 90 variétés issues de mutagenèse ont été recensées par la FAO/IAEA. NON en France
Croisements interspécifiques	OUI à l'étranger Le soja peut se croiser avec <i>G. soja</i>. Des populations issues de croisements interspécifiques avec <i>G. soja</i> ont été créées afin d'introduire dans <i>G. max</i> des caractères de teneurs élevées en protéines et de haut rendement en semences. Des lignées issues d'une de ces populations sont en cours d'expérimentation. De telles variétés ont déjà été produites aux États-Unis.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	ESSAIS Des soja tétraploïdes sont en cours d'évaluation à l'INRA.
Transgénèse	OUI 1^{re} transformation. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce à la fin des années 1980. Essais au champ. Le soja transgénique a fait l'objet de nombreux essais au champ. Rien qu'aux États-Unis, près de 440 essais au champ avaient déjà été réalisés en 2000. En France, il n'y a eu qu'un seul essai au champ de soja transgénique en 2000 qui n'a pas été poursuivi ultérieurement. Variétés transgéniques existantes (cf. encadré p. 684 et 685). Des variétés transgéniques de soja sont résistantes aux herbicides. Aventis CropScience commercialise, aux États-Unis (depuis 1998), au Canada et au Japon des variétés résistantes au glufosinate d'ammonium. Depuis 1996, Monsanto commercialise plus d'un millier de variétés de soja résistantes au glyphosate. De nombreux pays cultivent ce type de soja. Enfin, Dupont Canada Agricultural Products a réalisé des variétés à haute teneur en acide oléique.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	ESSAIS La multiplication <i>in vitro</i> a été essayée sans succès pour multiplier des structures hybrides interspécifiques. Par contre, les progrès enregistrés dans le taux de formation de bourgeons grâce à des modifications dans la composition des milieux de culture, sont utilisés pour la production de plantes transgéniques.
Haploïdisation	AUCUNE

suite...

... suite

Sélection sanitaire	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	ESSAIS Des stérilités mâles nucléaires existent. Elles ne sont utilisées que pour rendre allogame une population dans le but de favoriser le brassage génétique. Toutefois, aucune création variétale n'en a encore résulté.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs moléculaires servent à gérer les ressources génétiques. Ils sont aussi utilisés pour suivre des généalogies. Les États-Unis déploient des moyens financiers colossaux pour la génomique du soja. Il est certain que de très nombreux marqueurs sont déjà disponibles. Il existe, par exemple, des marqueurs de haut rendement, de grande taille des graines et de haute teneur en acide stéarique. Des QTL de rendement de <i>G. soja</i> ont été introduits dans <i>G. max</i> et les variétés récemment produites présentent un gain de rendement de 9 %.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Méthode généalogique différée ('Saïga') Filiation monograine classique (SSD) après hybridation manuelle ('Alaric', 'Sepia' et plus généralement la quasi-totalité des variétés inscrites au catalogue officiel français).
Types variétaux	Variété population. C'était le cas des premières variétés introduites en France. Variété lignée pure. Toutes les variétés sont de ce type depuis les années 1970.

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation dans au moins un pays

Résistance aux herbicides à phosphinothricine [exemple : événement GU262] (Aventis CropScience). La phosphinothricine est le composé actif des herbicides à glufosinate d'ammonium. Cette substance provoque une diminution de la production de glutamine et une accumulation d'ammoniaque dans les tissus qui conduit à la mort des plantes traitées. L'expression du gène <i>pat</i>, provenant de la bactérie du sol <i>Streptomyces viridochromogenes</i> (événements A2704-12 / A2704-21 / A5547-35 / GU262 / A5547-127) ou l'expression du gène <i>bar</i> isolé de <i>S. hygrosopicus</i> (événements W62 / W98), permettent de conférer une résistance aux herbicides Basta®, Rely®, Final® et Liberty®. En effet, la protéine codée par ces gènes, la PAT (phosphinothricine-N-acétyltransférase), détoxifie la phosphinothricine (composé actif des herbicides) en catalysant son acétylation. La PAT ne présente aucune homologie avec des protéines connues pour leur caractère allergène ou toxique. Les lignées résistantes aux herbicides à phosphinothricine ne diffèrent pas des lignées non transgéniques en ce qui concerne les teneurs en isoflavones, en facteurs antinutritionnels, en protéines, vitamines, etc. Résistance au glyphosate [événement GTS 40-3-2] (Monsanto Company). La 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthétase (EPSPS) est une enzyme, présente exclusivement chez les plantes et les bactéries, qui est responsable de la biosynthèse des acides aminés aromatiques tels que la tyrosine, la phénylalanine et le tryptophane. Le glyphosate, agent actif de l'herbicide Roundup®, agit en se fixant et en inactivant l'EPSPS. Un gène, découvert chez la souche

CP4 d'*Agrobacterium tumefaciens*, code une EPSPS insensible au glyphosate (CP4 EPSPS). L'affinité du glyphosate pour la CP4 EPSPS est très faible, ce qui permet aux plantes produisant cette enzyme de résister à l'herbicide. Des animaux nourris avec une nourriture contenant un supplément en cette protéine n'ont pas eu de problèmes particuliers. Les lignées résistantes au glyphosate ne diffèrent pas des lignées non transgéniques en ce qui concerne les teneurs en isoflavones, en principes anti-nutritionnels, en protéines, vitamines, etc.

Haute teneur en acide oléique [événements G94-1, G94-19, G168] (Dupont Canada Agricultural Products). Un gène (*Gmfad2-1*) codant une désaturase d'acide gras a été isolé dans *G. max*. Ce gène a été placé sous le contrôle d'un promoteur spécifique de la graine. Un phénomène, la non-expression d'un gène (*gene silencing*) conduit à l'arrêt de l'expression du transgène et du gène endogène. Le blocage de l'expression du gène *fad2*, entraîne un arrêt de la voie de biosynthèse des acides gras, ce qui se traduit par une augmentation de la teneur en acide oléique (80 %). Les lignées riches en acide oléique ne diffèrent pas des lignées non transgéniques en ce qui concerne les teneurs en isoflavones, en anti-nutritionnels, en protéines, vitamines, etc.

Perspectives d'amélioration

Avec l'apparition de l'encéphalite spongiforme bovine (ESB) et l'interdiction d'utilisation des farines animales, un certain regain d'intérêt pour les protéines végétales est prévisible. Le soja ayant un bon rendement (25 q/ha) et un taux de protéines de 40 % (riche en lysine, mais pauvre en acides aminés soufrés), il pourrait être un bon candidat pour produire des protéines.

En 2005, près de 60 % du soja produit dans le monde étant transgénique, il est peut-être intéressant d'essayer de développer une filière non-OGM en France, en particulier, pour le soja destiné à l'alimentation humaine. Si le rendement du soja est plus élevé en France qu'aux États-Unis (20 q/ha), il n'en est pas de même pour la teneur en protéines et pour l'homogénéité des lots. La culture du soja bénéficiera-t-elle de cette conjoncture? À l'heure actuelle, les décideurs français ou européens ont une politique agricole plutôt défavorable aux plantes oléagineuses et plus particulièrement au soja, considérant notamment qu'il est moins onéreux d'importer du tourteau que de relancer la culture du soja en France.

Il s'agit aussi d'intégrer les apports de la génomique dans la sélection. Ceci implique de passer de la connaissance des gènes candidats à l'étude de leur variabilité, à la quantification du polymorphisme dans les différents compartiments (collections historiques, populations dynamiques, populations élites), puis à l'estimation des effets alléliques dans les populations des sélectionneurs (c'est-à-dire les descendances de croisements entre des lignées élites). Les attendus concernent aussi bien l'identification des zones du génome soumis à la sélection que l'identification des sites au sein des séquences géniques responsables des phénotypes, ou encore de la définition de règles de gestion de populations pour concilier progrès génétique et conservation du polymorphisme.

Caractères à améliorer

Qualité de la graine. Ce caractère n'a pas encore été beaucoup travaillé en sélection.

Cas du soja transformé avec un gène du noyer du Brésil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.)

Dans le but d'augmenter la teneur en protéines et d'accroître la proportion d'acides aminés soufrés, un gène du noyer du Brésil (*Bertholletia excelsa*, Lécythidacées) codant une protéine de réserve a été introduit dans le soja. Cette protéine s'est avérée posséder un fort pouvoir allergisant et, en toute logique, la lignée de soja transgénique surproduit cette protéine aussi. Bien qu'il n'y ait jamais eu de variété, cet exemple devenu célèbre est souvent cité par les opposants aux OGM pour montrer les risques des plantes transgéniques.

Protéines. La teneur en protéines ainsi que la composition en acides aminés soufrés mériteraient d'être augmentées. Bien que les premières stratégies employées se soient avérées infructueuses (cf. encadré ci-dessus), la transgénèse reste un outil de choix pour améliorer ce caractère.

Substances indésirables. Le soja contient un certain nombre de facteurs défavorables qu'il faudrait limiter par sélection.

– *Raffinose et stachyose.* Ces deux sucres ont un goût désagréable et sont mal digérés par certaines personnes. La transgénèse paraît la méthode la plus adaptée pour réduire leur teneur.

– *Inhibiteurs trypsiques.* Ces inhibiteurs de protéase sont détruits par un traitement par la chaleur. Cela explique pourquoi la plupart des tourteaux utilisés sont grillés.

– *Hémagglutinines.* Ces substances peuvent provoquer l'agglutination des globules rouges *in vitro*. Par contre, leur activité est inconnue *in vivo* chez l'homme comme chez l'animal.

Substances d'intérêt. Le soja contient des quantités intéressantes de saponines et d'isoflavones. L'importante variabilité naturelle présente dans l'espèce pour ces caractères laisse présager que des progrès peuvent être obtenus.

– *Saponines.* Elles diminuent le taux de cholestérol, renforcent le système immunitaire, inhibent la croissance de certaines cellules cancéreuses, etc. ;

– *Isoflavones.* Elles diminuent les risques de certains cancers, de l'ostéoporose, des maladies cardiovasculaires et les symptômes de ménopause (phytoœstrogènes).

Stabilité de la teneur en protéines. De grandes différences dans la teneur en protéines sont encore observées d'une année à l'autre.

Résistance au *Sclerotinia sclerotiorum*. La méconnaissance de ce bio-agresseur fongique fait qu'il est actuellement assez difficile d'évaluer le comportement des variétés vis-à-vis de la maladie dont il est responsable.

Critères agronomiques. À l'heure actuelle, les variétés disponibles ont un rendement catastrophique une année sur cinq. Le soja ne supporte pas les stress hydriques continus surtout au début de la formation des graines. Il est donc

Variété hybride F₁ de soja

L'hétérosis est importante chez le soja. Ainsi, le gain en végétation apporté par la formule de l'hybride est de l'ordre de 20 à 30 % tandis que le gain de rendement en grain est de l'ordre de 10 à 15 %. Les hybrides sont aussi bien plus stables en culture que les lignées pures. Le fait que le pollen du soja soit de bonne qualité et que la fleur ait du nectar, rend potentiellement envisageable la réalisation d'hybrides F₁. Toutefois, la plupart des stérilités mâles actuellement disponibles sont nucléaires et les problèmes liés à la maîtrise du transport de pollen sur les plantes femelles (mâles stériles) ne sont pas résolus.

prioritaire de sélectionner des plantes résistantes à la sécheresse. Un autre grand objectif de sélection consiste à obtenir des variétés valorisant mieux l'azote. Ceci pourrait être obtenu en améliorant la complémentarité des deux voies d'assimilation de l'azote.

Rendement. L'accroissement et la régularisation du rendement sont deux caractères très importants. Le passage aux variétés hybrides pourrait être une solution intéressante (cf. encadré ci-dessus).

Techniques à développer

Des programmes importants de génomique sont développés dans le monde, en particulier aux États-Unis. Ils devraient déboucher sur le clonage de gènes-clés dans les différentes voies métaboliques. Des marqueurs moléculaires des allèles les plus favorables de ces gènes pourront être recherchés et seront utilisés pour faire de la transgénèse ou de la sélection assistée par marqueurs.

Les premiers résultats d'introgression de gènes, à l'aide de marqueurs moléculaires, en provenance de l'espèce voisine *G. soja* commencent à apparaître et laissent supposer d'importants progrès dans l'avenir.

Inscription et protection des variétés en France

1968, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste spéciale de plantes oléagineuses multipliées en France en vue de leur exportation.

1974, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste provisoire de variétés de soja admises à certification.

1975, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste de variétés de soja.

1981, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste B soja.

En 2003, 41 variétés étaient inscrites (34 en liste A et 7 en liste B) au catalogue officiel français et 350 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 18 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de

l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de ces 2 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Durant cette même période, des tests VAT sont effectués. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des pays de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de référence sont constitués par 3 variétés parmi les plus cultivées pour chacun des groupes de précocité. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Pour en savoir plus

- Beversdorf W.D.**, 1993. Le soja. Dans : *Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE Éditions, Paris, 17-26.
- Beversdorf W.D., Buzzell R.I., Ablett G.R. et Volden H.D.**, 1995. Soybean. Dans : *Harvest of gold : The history of field crop breeding in Canada*, A.E. Slinkard et D.R. Knott, éd., University Extension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, 153-166.
- Clive J.**, 2000. Global Review of Commercialized Transgenic Crops : 2000. *ISAAA Briefs*, 23, 110 p.
- Concibido V.C., La Vallee B., McIaird P., Pineda N., Meyer J., Hummel L., Yang J., Wu K. et Delannay X.**, 2003. Introgression of a quantitative trait locus for yield from *Glycine soja* into commercial soybean cultivars. *Theor. Appl. Genet.*, 106 (4), 575-582.
- Dunleavy J.**, 1973. Soybeans. Dans : *Breeding Plants for Disease Resistance. Concept and Applications*. The Pennsylvania State University Press. University Park and London, 270-286.
- Huang J., Rozelle S., Pray C. et Wang Q.**, 2002. Plant biotechnology in China. *Science*, 295 (5555), 674-677.
- Kaneda Y., Tabei Y., Nishimura S., Harada K., Akihama T. et Kitamura K.**, 1997. Combination of thiodiazuron and basal media low salt concentrations increases the frequency of shoot organogenesis in soybeans [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Plant Cell Rep.*, 17 (1), 8-12.
- Leclercq V., Bertrand J.-P. et Laurent C.**, 1983. *Le monde du soja*. La Découverte, Maspero, Paris, 123 p.
- Mian M.A.R., Bailey M.A., Tamulonis J.P., Shipe E.R., Carter T.E., Parrott W.A., Ashley D.A., Hussey R.S. et Boerma H.R.**, 1996. Molecular markers associated with seed weight in two soybean populations. *Theor. Appl. Genet.*, 93 (7), 1011-1016.

- Moule C.**, 1973. Soja. Dans : *Plantes sarclées et diverses*. La Maison rustique, Paris, 40-48.
- Norlee J.A., Taylor S.L., Townsend J.A., Thomas L.A. et Bush R.K.**, 1996. Identification of a Brazil-nut allergen in transgenic soybeans. *N. Engl. J. Med.*, 334 (1), 688-692.
- Roumet P.**, 1992. Le soja. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 161-172.
- Schad C., Mayer R. et Hughes P.**, 1947. *Le soja*. Imprimerie nationale, Paris, 128 p. et 12 planches.
- Singh R.J. et Hymowitz T.**, 1999. Soybean genetic resources and crop improvement. *Genome*, 42 (4), 605-616.
- Spencer M.M., Pantalone V.R., Meyer E.J., Landau-Ellis D. et Hyten D.L.**, 2003. Mapping the *Fas* locus controlling stearic acid content in soybean. *Theor. Appl. Genet.*, 106 (4), 615-619.

La tomate

Lycopersicon esculentum Mill. ($2n = 2x = 24$)
(Solanacées)

Présentation de l'espèce

L'ancêtre probable de la tomate, *Lycopersicon pimpinellifolium* (Jusl.) Mill., est originaire du nord-ouest de l'Amérique du Sud. Cette espèce a migré vers le Mexique où elle a été domestiquée par les Aztèques, sous la forme d'une tomate à très petit fruit, *Lycopersicon esculentum* Mill. var. *cerasiforme* (Dunal) Alef. La tomate a été introduite, au début du XVI^e siècle, du Mexique en Espagne, puis en Italie, où le botaniste P.A. Matthioli l'a décrite portant des fruits jaunes d'où son appellation *pomodoro*. Elle a ensuite été introduite en France et dans toute l'Europe, mais a longtemps été considérée comme une plante toxique et donc ornementale. Olivier de Serres (1539-1619) écrivait même que « leurs fruits ne sont bons à manger, seulement sont-ils à la médecine et plaisants à manier et flairer ». Cette suspicion des savants a persisté jusqu'au XVIII^e siècle, mais cela n'a pas empêché les paysans siciliens de l'adopter. La lenteur de la diffusion de la tomate s'explique plus probablement par les difficultés de culture d'une espèce qui n'était pas adaptée aux climats européens. Les premières variétés de tomate, *Lycopersicon esculentum* Mill. var. *esculentum*, sont apparues dans le catalogue de Vilmorin en 1778. De cette période jusqu'à nos jours, la consommation de ce légume n'a pas cessé d'augmenter. La sélection de la tomate, avec hybridation contrôlée et choix de plantes dans les descendance n'a débuté qu'au XIX^e siècle : 7 variétés étaient proposées dans le catalogue Vilmorin-Andrieux de 1856. Il a fallu attendre le développement des marchés de primeurs au début du siècle puis 1940, avec l'apparition des premières variétés pour la transformation industrielle, adaptées à la récolte mécanique, pour que la culture de ce légume connaisse une considérable expansion.

La tomate est une plante annuelle en France, car elle ne résiste pas aux températures inférieures à 5 °C. Elle est autogame, avec une fleur dépourvue de nectar, et multipliée par semences. Dans un champ de tomate, le taux d'allogécondation au champ, en milieu tempéré, est limité à quelques pour mille. En milieu

tropical, le taux d'allogamie est nettement supérieur du fait d'une modification de la biologie florale et de la présence de nombreux insectes pollinisateurs. Il n'existe aucune espèce sauvage susceptible de se croiser avec la tomate en France. La tomate possède une variabilité morphologique importante du port de la plante et de la forme, la taille et la couleur du fruit. La plupart de ces caractères sont contrôlés par des facteurs mono- ou oligogéniques. La variabilité utilisée actuellement au sein de *Lycopersicon esculentum*, espèce cultivée et autogame, est assez faible par rapport à la variabilité naturelle existante. C'est pour cela que les sélectionneurs ont été conduits à exploiter largement la variabilité des espèces sauvages apparentées, en particulier pour introduire des gènes de résistance à différents agents pathogènes, par croisements interspécifiques.

Il existe de nombreuses collections de tomate dans le monde. L'université de Californie (États-Unis) a notamment effectué de nombreuses prospections à partir de 1948, ce qui lui a permis de rassembler une importante collection au *Tomato Genetics Resource Center* (TGRC), en particulier des génotypes appartenant à des espèces sauvages et des mutants monogéniques. Si la plus grande collection au monde est probablement celle de l'AVRDC à Taiwan, celle du TGRC aux États-Unis et celle de l'Institut Vavilov (VIR) en Russie sont aussi très conséquentes. Des banques de gènes plus modestes sont entretenues dans de nombreux autres pays dont la France. L'INRA conserve actuellement plus de 1 000 génotypes, dont environ la moitié dans le cadre du réseau français de conservation des Solanacées à graines.

Production et utilisation

Le produit récolté, la tomate, est un fruit charnu, une baie.

La tomate est le légume le plus consommé dans le monde. Plus de 108 millions de tonnes de ce légume sont produits dans le monde, les plus grands pays producteurs étant la Chine (30,1 millions de tonnes), les États-Unis (12,8 millions de tonnes), la Turquie (8 millions de tonnes), l'Inde (7,6 millions de tonnes) et l'Italie (7,5 millions de tonnes). La production française (810 000 tonnes) est largement insuffisante pour couvrir les besoins en tomate de notre pays (données FAO, 2004).

La tomate est, à présent, consommée en frais toute l'année en raison de cultures sous abri mises en place du nord au sud de l'Europe. Les besoins français sont couverts en hiver par des importations provenant essentiellement du Maroc, puis de l'Espagne. Elle a aussi de nombreux débouchés industriels : concentré, jus, ketchup, tomate pelée, tomate concassée, poudre, etc. La France produit deux fois plus de tomates pour le marché de frais que pour celui de l'industrie. Le maintien de la culture de la tomate d'industrie en France, moins rémunératrice, est remis en cause régulièrement, compte tenu des charges de culture supérieures à celles de l'Italie et de la politique des subventions.

Histoire des variétés cultivées en France

Tomate pour le marché de frais

Les plantes de ce type ont le plus souvent une croissance indéterminée.

1856, '**Rouge Grosse**', '**Rouge Hâtive**', '**Jaune Grosse**', '**Rouge Ronde**', '**Poire**', '**Petite Jaune**' et '**Cerise**', variétés inscrites au catalogue Vilmorin-Andrieux.

1888, '**Chemin**' (Chemin, France), variété obtenue par un maraîcher d'Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine). C'est une amélioration de la variété 'Perfection' obtenue par Livingstone (États-Unis).

Vers 1950, '**Marmande**', variété fixée à croissance indéterminée pour la culture tuteurée de plein champ, comprenant des variétés telles que 'Marmande hâtive', 'Plate de Châteaurenard', 'Marmande à gros fruits' ou 'Marmande VR'. Sa précocité lui a permis d'être apte à la culture de primeur de plein champ. Le fruit est gros, plat, côtelé et de bonne qualité gustative. Les variétés du type 'Marmande' ont été très cultivées jusqu'aux années 1960 et le sont encore dans quelques régions d'Italie et d'Espagne où elles alimentent les marchés locaux. Elles continuent à être très cultivées par les jardiniers amateurs, malgré une sensibilité aux maladies, un rendement irrégulier et un manque de fermeté, une sensibilité à la fente et l'irrégularité de la forme du fruit.

Vers 1950, '**Saint-Pierre**', variété tardive à croissance indéterminée pour la culture tuteurée de plein champ. Le fruit est gros, rond et charnu. Elle a été très cultivée de 1950 à 1965. Elle a servi de géniteur pour obtenir des variétés hybrides F_1 telles que 'Pyros', 'Fandango' et 'Flamingo' (Clause, France), moins sensibles à la fente et résistantes à quelques maladies.

1956, '**Fournaise**' (Vilmorin-Andrieux, France), première variété hybride F_1 . Elle se caractérise par une grande précocité. Cette variété, à croissance indéterminée, produit un fruit rond, mou, d'un calibre petit à moyen.

Vers 1960, '**Moneymaker**', variété fixée à croissance indéterminée, produisant un fruit rond de calibre petit à moyen. Cette variété se caractérise par sa croissance régulière, donnant des plantes à fruits de forme homogène et de calibre moyen, à deux loges. Elle a été très cultivée aux Pays-Bas et en France dans les années 1960 pour les premières cultures sous serre, puis utilisée comme géniteur. Ces qualités l'ont conduite à être choisie comme variété modèle à l'INRA, pour l'introduction et l'évaluation de gènes de résistance aux maladies. C'est ainsi qu'il existe une série de lignées ('Monalbo', 'Momor',...) quasi isogéniques de 'Moneymaker' et multirésistantes pour un ou plusieurs des douze gènes suivants : *V₂*, *I*, *I-2*, *Fr1*, *py1*, *Mi*, *Sm*, *Pto*, *Tm-1*, *Tm-2*, *Tm-2²* et *Sw5*.

1963, '**Montfavet H63-5**' (INRA, France), première variété hybride F_1 ayant connu un succès commercial. Au début des années 1970, cette variété a représenté, en France, 80 % des surfaces de serre et 50 % des cultures de plein

champ. Elle a aussi été cultivée abondamment dans tout le Bassin méditerranéen. L'excellente qualité du pollen et de la nouaison de cette variété, en particulier dans des conditions de basse température, explique son succès. Elle est encore cultivée actuellement par les jardiniers amateurs. Cet hybride à croissance indéterminée, produit un fruit de calibre moyen, de forme ronde à légèrement aplatie. Les parents de cette variété, 2 lignées sélectionnées par l'INRA, ont été très utilisés comme géniteurs des variétés créées dans les années 1970. 'Montfavet H63-4' (INRA, France), version à croissance déterminée a aussi été très cultivée.

Vers 1970, '**Florida MH1**', variété fixée d'origine nord-américaine, à croissance déterminée, produisant un gros fruit légèrement aplati. Cette variété destinée à la culture non tuteurée en plein champ a été cultivée en France dans les années 1970. Elle se caractérise par la relative fermeté de son fruit, caractère provenant en partie d'un croisement interspécifique avec *L. pimpinellifolium* (Jusl.) P. Mill. Cette variété a, depuis, été utilisée comme géniteur pour la sélection de la « fermeté ».

1973, '**Lucy**' et '**Vemone**' (Les Graines Caillard, France), variétés hybrides F₁ comparables à 'Montfavet H63-5', mais plus vigoureuses et possédant une résistance à la verticilliose et au virus de la mosaïque du tabac, et un fruit de meilleure présentation. Elles ont été très cultivées sous serre de 1975 à 1980.

1979, '**Carmello**' (Les Graines Caillard, France), variété hybride F₁, destinée à la culture tuteurée de plein champ. Elle se caractérise par une grande plasticité, de nombreuses résistances aux maladies, une bonne capacité de nouaison et la grosseur de son fruit. Vers 1982, elle représentait près de 80 % des surfaces tuteurées de plein champ en France. Elle a ensuite connu un succès commercial dans l'ensemble du Bassin méditerranéen.

1984, '**Trésor**' (Clause, France), variété hybride F₁ comparable à 'Montfavet H63-5', destinée à la production sous serre, et ayant connu un succès commercial à la fin des années 1980.

1986, '**Ferline**' (INRA, France), variété hybride F₁, destinée à la culture tuteurée de plein champ, se distinguant par un fruit ferme et de belle coloration. Cette variété à croissance indéterminée produit un fruit rond. Elle a été très cultivée dans le Sud-Ouest à la fin des années 1980. Elle a représenté une innovation à cette époque pour la qualité du fruit. Une version à croissance déterminée pour la culture à plat a connu aussi un grand développement en France ('Valina', INRA, France).

1987, '**Caraïbo**' (INRA, France), variété fixée, hautement tolérante en régions tropicales au flétrissement bactérien, maladie causée par *Ralstonia solanacearum* (anciennement *Pseudomonas solanacearum*). Elle est plus particulièrement destinée à la culture dans les Caraïbes du fait de sa bonne capacité de nouaison dans des conditions de haute température et de forte humidité (conditions des régions tropicales humides) et de son haut niveau de résistance à plusieurs bio-agresseurs.

1989, '**Daniela**' (Hazera, Israël), première variété hybride F₁ pour culture sous serre, se caractérisant par une longue conservation du fruit (gène *rin* à l'état hétérozygote). Cette variété, destinée à la culture sous serre, est la plus cultivée dans le monde depuis 1992. Ce matériel a été très utilisé comme géniteur dans les années 1990.

1991, '**Cencara**' (Vilmorin, France) et '**Olivade**' (Gautier, France), exemples de variétés hybrides F₁ à croissance indéterminée qui ont permis de diversifier la production de la tomate de serre : le fruit est de forme allongée.

1993, '**Laurélia**' (Rijk Zwaan, Pays-Bas), variété hybride F₁ destinée à la culture sous serre, qui a été sélectionnée pour une résistance à *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici*, champignon qui cause de gros dégâts au niveau des racines et du collet, en culture hors sol.

1995, '**Prémio**' (Clause SP, France), exemple de variété hybride F₁ permettant de diversifier la production de la tomate sous serre : les fruits sont récoltés en grappe.

1997, '**Rapsodie**' (S & G Seeds BV, Pays-Bas), exemple de variété hybride F₁ de tomate charnue (poids supérieur à 200 grammes), qui a contribué avec de nombreuses autres variétés à diversifier le marché de la tomate (récolte en caissettes alvéolées).

1999, '**Dolcevit**' (De Ruiters, Pays-Bas) et 2002, '**Apéro**' (Graines Gautier, France), deux exemples de variétés hybrides F₁ de tomate cerise, dont le fruit pèse environ 10 grammes, permettant la diversification de la production de la tomate.

2001, '**Sapho**' (Graines Gautier, France), exemple de variété hybride F₁ de tomate cocktail, dont le fruit pèse entre 20 et 40 grammes, permettant de diversifier le marché de la tomate.

Tomate pour l'industrie

Les plantes de ce type ont une croissance déterminée adaptée à une culture non tuteurée.

1955, '**Roma**', variété fixée nord-américaine possédant dans ses géniteurs la variété 'San Marzano' (à croissance indéterminée) utilisée de manière traditionnelle en Italie pour la fabrication de sauce. Le fruit est de forme allongée.

1965, '**Roma VF**', variété fixée, de type Roma. Cette variété est résistante à la verticilliose et à la race 0 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*.

1970, '**Rossol**' (INRA, France), variété fixée de type 'Roma VF', résistante à la verticilliose, aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) et à la race 0 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Cette variété est encore très cultivée dans les pays situés en zone subtropicale où les sols sont souvent infestés par les nématodes.

1976, '**UC 82**' (synonymes : '**Davis UC82**' et '**Early Mech**') (université de Californie, Davis, États-Unis), variété fixée précoce à fruit cubique, se distinguant par son adaptation à la récolte mécanique grâce au port compact de la

plante, au groupement de la maturité et à la bonne tenue du fruit à surmaturité, facilitant ainsi l'empilage dans les bennes.

1984, '**Lérica**' (Caillard, France), variété hybride F₁ destinée à la fois au marché du frais et à celui de l'industrie, produisant un fruit allongé. Cette variété a occupé, avec 'Rio Grande', une situation de quasi-monopole pour ces créneaux jusqu'à l'apparition de la variété 'Cannery Row'.

1987, '**Cannery Row**' (Ferry Morse, États-Unis), variété fixée représentant, en 2000, environ 35 % du marché français. Le fruit est de forme allongée.

1993, '**Perfectpeel**' (Petoseed US, États-Unis), variété hybride F₁, représentant, en 2000, environ 35 % du marché français. Elle produit un fruit de forme allongée pour la tomate pelée.

1997, '**Cantou**' (INRA, France / Sonito, France), exemple de variété hybride F₁ précoce permettant d'ouvrir plus tôt les usines et ainsi d'allonger la période d'activité de celles-ci.

1998, '**Pistou**' (INRA, France / Sonito, France), variété fixée se caractérisant par une plus haute teneur en matière sèche du fruit que les variétés lignées et hybrides F₁ traditionnelles, mêmes récentes.

2000, '**Caladou**' (INRA, France / Graines Gautier, France / Sonito, France), variété hybride F₁ se distinguant par une résistance à la maladie bronzée de la tomate (TSWV) et aux nématodes à galles *Meloidogyne* spp.

2001, '**Capitou**' (INRA, France / Sonito, France), variété hybride F₁ se caractérisant par une plus haute teneur en matière sèche du fruit que les variétés lignées et hybrides F₁ traditionnelles, mêmes récentes, et par une bonne conservation.

Porte-greffe

1984, '**Brigéor**' (INRA, France), variété de porte-greffe hybride F₁ interspécifique, avec des résistances provenant de *L. esculentum* (gènes *Ve*, *I*, *I-2*, *Frl*, *Tm-2²* et *Mi*) et de résistances provenant de *L. hirsutum* Humb. et Bonpl. (résistance à la maladie des racines liégeuses ou *corky root* due à *Pyrenochaeta lycopersici* et résistance au champignon *Didymella lycopersici*). Les variétés de tomate (ou d'aubergine) pour la culture sous serre sont greffées sur ce porte-greffe ou sur d'autres de type KNVFFr (c'est-à-dire résistant à : K = *corky root*, N = nématodes à galles *Meloidogyne* spp., V = *Verticillium dahliae*, F = *Fusarium solani*, Fr = *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici*).

Remarque. Actuellement, il y a une grande spécialisation des types de tomate selon leur mode de culture (plein champ, serre, conduite tuteurée ou non,...) et leur destination (industrie, frais en grappe, frais en vrac,...) qui conduit à un élargissement de la gamme variétale. Les possibilités d'introduction de gènes par croisements inter-spécifiques restent nombreuses, notamment dans le domaine des résistances aux maladies, de la teneur en matière sèche et de la résistance aux stress.

Regard sur 50 ans de sélection

Les États-Unis ont été les pionniers de l'amélioration de la tomate, particulièrement pour la tomate d'industrie, leurs programmes ayant débuté dès les années 1920, alors que ce n'est que dans les années 1950 que l'INRA a débuté les siens en France et 1960 pour les sélectionneurs privés européens. Actuellement, cette espèce est améliorée dans le monde entier, aussi bien par les entreprises privées que par les organismes publics.

En Europe, des années 1920 aux années 1960, la culture de la tomate était assurée par des maraîchers. À cette époque, les variétés étaient des lignées plus ou moins bien fixées obtenues par sélection massale ou par sélection généalogique. Ces méthodes ont permis de sélectionner des mutations favorables et les meilleures recombinaisons lorsque la sélection se faisait après des hybridations dans des variétés populations. Les cultures les plus rémunératrices de cette période étant celles dites de primeur, les maraîchers puis les sélectionneurs se sont attachés à produire des variétés très précoces. En parallèle, les pratiques culturales ont évolué avec l'adoption successive de la culture protégée par des haies dans le sud-est de la France, puis sous châssis et enfin sous tunnel en plastique et sous serre en verre, à partir de 1960.

Dans le début des années 1960, le maraîchage s'intensifie. Les premières serres sont installées et des agriculteurs se spécialisent dans la culture de la tomate. Le marché devient exigeant dans la qualité des variétés et des produits commercialisés. La sélection de la tomate prend alors véritablement son essor. À cette même période, les premières variétés hybrides F_1 sont créées, sachant qu'un effet d'hétérosis (vigueur, précocité) avait été mis en évidence chez la tomate dès 1933. Néanmoins, la sélection de lignées à haut rendement est possible et le marché pour l'industrie est encore pourvu par des variétés lignées qui représentent 80 % du marché.

Il faut attendre le milieu des années 1960 pour que se répande l'usage de variétés destinées à la culture de plein champ, possédant au moins une résistance à un bio-agresseur provenant d'hybridation interspécifique. Entre 1965 et 1985, la production sous serre ne cesse de s'étendre jusqu'à constituer l'apport économique majoritaire du marché. Les variétés hybrides F_1 se sont avérées particulièrement bien adaptées à ce mode de production.

De 1985 à 2000, la culture sous abri, plus sécurisante pour obtenir une même qualité de production tout au long de l'année, se généralise dans toute l'Europe, aux dépens notamment des cultures tuteurées de plein champ. Avec le développement du commerce international, nécessitant que le produit puisse être transporté sur de grandes distances, et avec l'augmentation de la distribution des fruits et légumes dans les grandes surfaces, il a fallu développer de nouvelles variétés adaptées à une production standardisée. La fermeté et l'aptitude à la longue conservation ont été les principaux caractères améliorés. Cependant, c'est aussi durant cette période qu'une grande diversification des variétés a été

apportée avec l'apparition de variétés en grappe, de tomate allongée, de tomate cocktail ou cerise, cultivées sous serre.

Après ces phases successives de sélection, les variétés modernes de tomate peuvent posséder jusqu'à 6 à 8 caractères de résistance génétique aux maladies, hérités d'espèces sauvages.

Caractères importants améliorés

Adaptation aux conditions de culture. Des variétés ont été créées pour une grande diversité de conditions de culture et de pratiques culturales. Les variétés de tomate peuvent être ainsi cultivées en plein champ, avec ou sans tuteurage. Elles peuvent être aussi cultivées sous abri, en plastique ou en verre, chauffé ou non, et avec culture en terre ou hors sol. Ces diversifications ont permis de promouvoir la culture de la tomate : elle a ainsi pu être cultivée sur de nouvelles aires de culture et en toutes saisons.

Adaptation à la culture sous serre. Les fleurs des variétés des années 1950 avortaient lorsque les plants de tomate étaient cultivés dans des conditions de faible luminosité, comme sous serre de l'automne au printemps. La sélection a permis d'obtenir des variétés capables de produire des fleurs ayant un pollen abondant et viable dans des conditions de jours courts croissants (France) ou décroissants (Espagne) et peu lumineux. La capacité de nouaison à basse température a aussi été améliorée. Ces variétés, à croissance indéterminée, se distinguent par un rendement annuel élevé.

Adaptation à la culture en plein champ pour l'industrie. Pour que la culture de la tomate d'industrie qui est peu rémunératrice puisse se développer, il a fallu créer des variétés pouvant être cultivées en limitant les frais de main-d'œuvre. Des variétés destinées spécifiquement à l'industrie ont été créées en associant le caractère de croissance déterminée (mutation *sp*) avec divers caractères : la floraison groupée, la conservation du fruit à surmaturité, la fermeté du fruit et le caractère d'absence de point d'abscission sur le pédoncule du fruit (*jointless*) (mutation *j-2*) venant de *L. cheesmanii* Riley, permettant de récolter une tomate sans calice ni pédoncule.

Adaptation aux pays tropicaux. Ces variétés doivent cumuler une adaptation au climat tropical humide et des résistances au flétrissement bactérien (*cf. p. ci-contre*) et aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.). Les seules variétés adaptées aux zones tropicales étaient des variétés à petit fruit. Il a donc fallu introduire le caractère gros fruit dans ces variétés adaptées au climat tropical.

Résistance aux maladies. Près de 200 maladies sont susceptibles de s'attaquer à la tomate au niveau mondial. Les variétés actuelles de tomate cumulent entre 6 à 8 gènes de résistance aux maladies, spécifiques des conditions de culture des variétés. Les variétés de tomate d'industrie possèdent simultanément des résistances à la verticilliose (*Verticillium dahliae*), à la fusariose (*Fusarium oxysporum*

f. sp. *lycopersici*, races 0 et 1), au *Pseudomonas tomato* et aux nématodes à galles (*Meloidogyne* sp.). Les variétés pour la culture sous abri cumulent des résistances à la mosaïque du tabac due à un virus (*Tobacco mosaic virus*, TMV), au *Verticillium dahliae*, au *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, races 0 et 1, au *Fulvia fulva* (anciennement *Cladosporium fulvum*) et au *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici* des racines (culture hors sol). Le cumul des gènes de résistance dans les variétés a été accéléré grâce au passage aux variétés hybrides F₁, car la plupart de ces gènes sont dominants. La création de porte-greffe résistants à de nombreuses maladies a aussi été un progrès notable. L'utilisation de résistances génétiques a permis d'intensifier et de beaucoup faciliter la culture de cette espèce. Quelques exemples de lutte génétique contre des bio-agresseurs importants de la tomate sont présentés ci-dessous :

Flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*, anciennement *Pseudomonas solanacearum*). C'est la maladie la plus importante en zone tropicale. Une résistance a été trouvée dans 'CRA 66'. Elle a été transférée dans des variétés plus modernes telles que 'Caraïbo' ou 'Calinago'. Cette résistance s'est montrée stable et efficace dans l'ensemble de la zone tropicale. D'autres résistances, provenant de 'H 7996' et 'H 7998', ont ensuite été associées à celle de 'CRA 66' afin de créer de nouvelles variétés.

Fusariose des racines (*Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici*). Cette maladie a été introduite en France par l'importation de plants de tomate dans du terreau contaminé. Cette maladie s'est propagée extrêmement rapidement en France et est spécifique des cultures hors sol. La sélection a permis de renouveler entièrement la gamme variétale en proposant des variétés résistantes grâce à l'introgression d'un gène (*Fr1*) en provenance de *L. peruvianum* (L.) Mill.

Insectes des serres. La généralisation de la culture d'un certain nombre d'espèces légumières et florales sous serre a entraîné l'émergence de bio-agresseurs tels que la mouche mineuse des feuilles (*Liriomyza* spp.) ou la mouche blanche (*Trialeurodes vaporariorum*). Aucune solution génétique satisfaisante n'a, jusqu'à présent, été mise en évidence pour lutter efficacement contre ces insectes de serre. La lutte biologique permet, par contre, à présent, d'apporter des réponses fiables.

Virus. Le gène *Tm-2²*, venant d'un croisement avec *L. peruvianum*, est présent dans la quasi-totalité des variétés résistantes au virus de la mosaïque du tabac. Cette résistance monogénique n'a pas été surpassée depuis son utilisation systématique pour les variétés de serre depuis 1975. Depuis 2000, des variétés de tomate de serre sont munies d'une résistance au virus de la maladie bronzée de la tomate (*Tomato spotted wilt virus*, TSWV) provenant de *L. peruvianum*. Une résistance partielle au virus de l'enroulement foliaire de la tomate (*Tomato yellow leaf-curl virus*, TYLCV) provenant de *L. peruvianum*, a aussi été introduite dans des variétés commerciales destinées aux marchés tropicaux et méditerranéens.

Fermeté. Les variétés de tomate cultivées dans les années 1950 donnaient un fruit assez mou, ce qui le rendait très difficile à transporter. Des progrès dans l'amélioration de ce caractère ont été obtenus, dès les années 1970, avec notamment l'introduction de gènes de fermeté provenant de *L. pimpinellifolium*. Cependant, les progrès les plus importants ont été obtenus, à partir de 1985, où la fermeté a été un des principaux critères de sélection. Après un long travail de sélection, des variétés présentant un fruit avec une plus grande épaisseur du péricarpe ont été sélectionnées. La fermeté de la tomate peut également être améliorée par l'introduction des gènes *rin* ou *nor* (cf. paragraphe suivant) qui peuvent ralentir la maturation du fruit.

Durée de conservation du fruit. Des gènes de blocage de la maturation ont été introduits à l'état hétérozygote dans certaines variétés de manière à allonger la durée de conservation de plusieurs semaines (10 à 30 jours dans le cas où le gène est à l'état hétérozygote et selon les conditions de culture et de conservation). C'est le cas de *rin* (*ripening inhibitor*, inhibiteur de maturation), ou de *nor* (*non ripening*, ne mûrissant pas) (qui induit une plus forte inhibition de la maturité que *rin*). Ces gènes réduisent la production d'éthylène, la biosynthèse de caroténoïdes, le ramollissement du fruit et le développement des arômes. Les premières variétés hybrides F₁ (*rin*/+) de longue conservation avaient le défaut de produire un fruit d'une coloration non uniforme, d'un rouge trop pâle à maturité et sans arôme. Les variétés actuelles de longue conservation produisent un fruit mieux coloré et ayant un peu plus de goût.

Présentation du fruit. Les variétés de la première moitié du XX^e siècle produisaient des tomates de calibre hétérogène. Une même variété produisait des tomates de couleur, de taille et de forme variées. Les fruits étaient très sensibles à l'éclatement. La sélection a permis de progresser dans l'obtention d'une production plus homogène. L'INRA et les sélectionneurs privés ont beaucoup travaillé de 1965 à 1980 pour améliorer la couleur interne et externe et l'homogénéité du calibre par réduction du nombre de loges dans le fruit. Par exemple, l'utilisation d'une mutation est à l'origine de la création de variétés à fruit d'un rouge homogène, sans collet vert (gène *u*, *uniform color*, couleur uniforme).

Diversification. Une gamme de variétés produisant des tomates de formes, calibres et tailles variés ont été sélectionnées. C'est ainsi que les sélectionneurs ont créé des variétés de tomate d'industrie de forme cubique, des variétés de tomate cocktail, de tomate cerise, de tomate adaptées à la commercialisation en grappe, etc.

Rendement. Sur 8 mois de récolte, le rendement des variétés adaptées à la culture sous serre aux Pays-Bas peut dépasser 500 t/ha et même atteindre 650 t/ha. Les variétés de tomate d'industrie, qui sont récoltées en une seule fois, ont un rendement proche de 80 t/ha. Le passage aux variétés de type hybride F₁ sous serre a permis d'accroître le rendement dans les conditions de milieu les moins favorables (culture précoce ou hivernale).

Teneur en matière sèche. La teneur en matière sèche soluble du fruit des variétés du début du siècle était comprise entre 5 et 5,5 %. En améliorant les variétés de tomate d'industrie pour l'adaptation à la récolte mécanique dans les années 1960-1980, la teneur en matière sèche a été involontairement contre-sélectionnée : elle est tombée à 4,5 %. Ce caractère étant très important pour la tomate d'industrie destinée à la transformation en concentré, des variétés contenant entre 5,5 et 6 % de matière sèche ont été sélectionnées de 1985 à 2000 à partir de croisements interspécifiques avec *L. pimpinellifolium*, *L. cheesmanii* Riley, *L. chmielewskii* Rick, Kesicki, Fobes & Holle, etc.

Qualité nutritionnelle. La tomate est très riche en sels minéraux ainsi qu'en vitamines. La consommation d'une tomate de taille moyenne apporte respectivement 57 %, 25 % et 8 % des doses journalières recommandées en vitamine C, en vitamine A et en fer. Des travaux de sélection ont été entrepris de manière à améliorer encore cette qualité nutritionnelle.

Diminution de la teneur en glycoalcaloïdes. La tomate contient des glycoalcaloïdes, principalement l' α -tomatine et la solanine. Ces substances sont des alcaloïdes toxiques et amers qui sont présents dans le fruit vert, mais qui disparaissent au cours de la maturation du fruit. Seules quelques variétés des Antilles produisent un fruit contenant un peu de glycoalcaloïdes à maturité.

Amélioration de la teneur en vitamines. Les Japonais ont lancé des programmes de recherche pour augmenter la teneur en vitamine C, tandis que les Bulgares ont sélectionné des variétés à fruit très riche en β -carotène. Des travaux sont entrepris pour augmenter la teneur en lycopène.

Difficultés et obstacles

Qualité organoleptique. La généralisation des variétés porteuses du gène de conservation *rin* (tandis que le gène *nor* n'est pratiquement pas encore utilisé), ainsi que la production de tomate dans des conditions insuffisantes d'ensoleillement (culture de serre d'automne et d'hiver), ont eu un effet néfaste sur les qualités gustatives de la tomate. Elles ont aussi contribué à une perception négative du travail de sélection sur ce légume par les consommateurs. Certaines variétés sélectionnées de 1970 à 1985, pourtant de bonne qualité organoleptique, ont été abandonnées à partir de 1985, en raison de leur manque de fermeté. Les sélectionneurs prennent en compte l'ensemble de ces critères de qualité dans les programmes de sélection depuis une dizaine d'années.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Un grand nombre de caractères importants sont à déterminisme génétique simple. De grandes collections de mutants isogéniques sont disponibles. Parmi les nombreux exemples, citons : – <i>rin</i> et <i>nor</i> permettant, lorsqu'ils sont à l'état hétérozygote, de ralentir la maturation ; – <i>u</i> permettant d'obtenir une coloration homogène du fruit avant maturité, sans collet vert ; – <i>B</i>, allèle conférant une haute teneur en β-carotène. Les tomates produites par les plantes porteuses de cet allèle sont orange ; – <i>sp</i> (<i>self pruning</i>, qui « se taille elle-même »), mutation apparue spontanément en 1914 en Floride et conférant aux plantes une croissance déterminée. Cette mutation a eu un rôle essentiel dans la mise au point des variétés de tomate d'industrie. Par ailleurs, il existe plusieurs gènes récessifs inducteurs de stérilité mâle nucléaire provenant de mutations spontanées.
Mutagenèse induite	ESSAIS en France OUI à l'étranger De nombreuses variétés ont été sélectionnées dans des pays tels que le Bangladesh, l'Inde et le Japon. Les mutations obtenues sont extrêmement variées : elles concernent le port compact de la plante, des résistances aux maladies, la précocité, le rendement, etc.
Croisements interspécifiques	OUI (quelques exemples classés par espèce sauvage d'origine) La culture <i>in vitro</i> (sauvetage d'embryons) est utilisée pour améliorer le taux de réussite des croisements. <i>L. cheesmanii</i> Gènes de résistance à la mouche mineuse des feuilles, <i>Liriomyza</i> spp. D'autres gènes conférant une résistance aux sols salins. <i>L. chmielewskii</i> Gènes conférant une haute teneur en matière sèche. <i>L. chilense</i> Dunal Gène de résistance à la sécheresse. <i>L. hirsutum</i> <i>Tm-1</i>, gène de tolérance au virus de la mosaïque du tabac. Il a été très utilisé dans les années 1970, mais il s'est révélé insuffisant. Il a été utilisé ensuite en association avec <i>Tm-2²</i>, dans l'objectif de limiter la variation des souches de virus. Il a été abandonné ensuite, le virus n'ayant pas évolué. <i>Cf-4</i>, gène de résistance à la cladosporiose (<i>Fulvia fulva</i>) de la tomate. La résistance partielle polygénique à <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> (maladie des racines liégeuses) a été exploitée dans des porte-greffe. La résistance polygénique au champignon <i>Didymella lycopersici</i> a été exploitée dans des variétés porte-greffe hybrides. D'autres gènes conférant des résistances à <i>Oidium neolycopersici</i> (introduit dans des variétés de serre), <i>Clavibacter</i> (ex <i>Corynebacterium michiganense</i> et au froid. <i>L. pennellii</i> (Correll) d'Arcy <i>1-3</i>, gène de résistance à <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i> race 2 a été introduit dans les variétés de serre depuis 1990. Gène de résistance à la sécheresse.

suite...

... suite

L. peruvianum

Frl, gène de résistance à *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici*. Il a été introduit, depuis 1990, dans de nombreuses variétés destinées à la culture hors sol sous serre.

pyl, gène de résistance à *Pyrenochaeta lycopersici*. Il n'est suffisamment efficace qu'à l'état homozygote et confère une résistance partielle.

Cf-4, gène de résistance à la cladosporiose de la tomate (*Fulvia fulva*). *Tm-2* et *Tm-2²*, gènes conférant une résistance au virus de la mosaïque du tabac. *Tm-2²* est utilisé de manière systématique dans les variétés de serre depuis les années 1970. La résistance procurée par ce gène n'a jamais été contournée.

Mi, gène conférant une résistance aux nématodes à galles *Meloidogyne* spp. Ce gène est présent dans de nombreuses variétés de tomate ainsi que dans des porte-greffe pour la tomate de serre.

D'autres gènes conférant des résistances au virus de l'enroulement foliaire de la tomate (TYLCV) (la première variété, 'TY-20') et au virus de la maladie bronzée de la tomate (TSWV).

L. pimpinellifolium

I et *I-2*, gènes de résistance à *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, races 0 et 1. Ces gènes ont été introduits couramment dans des variétés depuis les années 1950.

Ve, gène de résistance au *Verticillium dahliae*, découvert en 1951, introduit dans de très nombreuses variétés commerciales.

Cf-2, *Cf-5*, *Cf-6* et *Cf-9*, gènes de résistance à la cladosporiose introduits dans la plupart des variétés destinées à la culture sous serre.

Sm, gène de résistance à *Stemphylium* spp. présent dans de nombreuses variétés.

Pto, gène de résistance à *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. Il a été introduit dans des variétés de tomate d'industrie à partir d'une source de résistance : la lignée 'Ontario 7710'. Ce gène a été un des premiers gènes de résistance cloné chez la tomate (à partir de lignées de type Rio Grande dans lesquelles le gène *Pto* avait été incorporé). Gène conférant une résistance à la maladie bronzée de la tomate (TSWV) qui est beaucoup utilisé depuis 2000 pour la création de variétés de tomate destinées à la production en plein champ et sous serre, le virus étant très présent en France et dans le Bassin méditerranéen.

Autres gènes de résistance à *Ralstonia solanacearum* et à *Clavibacter* (ex *Corynebacterium*) *michiganense*.

Hybridation somatique

ESSAIS

La « pomate », « plante de laboratoire » sans aucun intérêt pratique, résulte de la fusion somatique entre cellules de tomate et cellules de pomme de terre. Cette fusion conduit à une plante stérile, ne produisant ni fruit, ni tubercule.

Une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique a été transférée grâce à cette méthode. Celle-ci ne semble pas être utilisée pour créer des variétés hybrides.

Élévation du niveau de ploïdie

ESSAIS

Transgénèse

1^{res} plantes transformées. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce au milieu des années 1980.

Essais au champ et commercialisation. En 2000, plus de 430 essais au champ de variétés de tomate transgénique avaient été réalisés aux États-Unis. La tomate est la première espèce au monde qui ait bénéficié d'une autorisation de mise sur le marché d'une variété transgénique.

suite...

... suite

Cette variété produisait un fruit se conservant plus longtemps (encadré haut de p. 705). Depuis, d'autres variétés de tomate transgénique ont obtenu une autorisation de commercialisation aux États-Unis. Il s'agit de variétés dont le fruit reste ferme plus longtemps ainsi que des variétés à fruit à maturation retardée et des variétés résistantes aux insectes (cf. encadré p. 705 et 706). D'autres recherches sont en cours (cf. encadré p. 706).

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	NON Le bouturage horticole est pratiqué de façon ponctuelle uniquement, par exemple pour sauver une plante dont l'autofécondation a échoué, dans un programme de recherche.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	ESSAIS Certaines plantes haploïdes, apparues spontanément, ont été recueillies. Il n'y pas d'application pratique.
Recours à la stérilité mâle	OUI Il existe une trentaine de gènes récessifs de stérilité mâle nucléaire, dont certains sont liés à des marqueurs morphologiques. Le gène <i>ms-35</i> a été utilisé dans les années 1970 pour la production de variétés hybrides F ₁ . ESSAIS Au moins une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique a été introduite dans la tomate. Néanmoins, du fait du rapide renouvellement des variétés, aucune stérilité mâle ne semble être très utilisée actuellement pour la production de semences hybrides F ₁ .
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE Chez l'espèce cultivée. Par contre, des phénomènes d'auto-incompatibilité ont été mis en évidence chez certaines espèces sauvages de <i>Lycopersicon</i> P. Mill.
Marquage moléculaire	OUI La tomate est une espèce modèle dans l'établissement de cartes génétiques et dans l'identification de QTL. Un grand nombre de marqueurs de gènes ou de QTL de résistance aux maladies ou contrôlant la qualité du fruit sont maintenant disponibles. Ils sont actuellement utilisés pour faire de la sélection assistée par marqueurs.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	La sélection généalogique est la méthode la plus employée, car elle permet de fixer rapidement les caractères à déterminisme génétique simple, qui sont abondants chez la tomate. Elle est combinée aux rétrocroisements pour introduire des caractères monogéniques. La sélection par filiation monograine est une alternative à la sélection généalogique qui est appliquée lorsque les caractères sont à faible héritabilité (par exemple, la teneur en matière sèche). La sélection récurrente est utilisée pour améliorer les populations pour les caractères à déterminisme génétique complexe.

suite...

... suite

Types variétaux

Variété fixée (ou variété lignée pure)

Variété hybride F₁. Dans le cas de la tomate, l'intérêt essentiel des variétés hybrides F₁ est de permettre un cumul plus rapide des gènes de résistance aux maladies qui sont souvent dominants. Dans la plupart des cas, la production de semences hybrides est assurée par castration manuelle des organes mâles des fleurs de la lignée parentale utilisée comme femelle.

‘Flavr Savr’, la première variété transgénique à avoir été commercialisée

En 1989, la société Calgene a contacté la *Food and Drug Administration* (États-Unis) pour demander l'autorisation de commercialiser une variété transgénique. Il a fallu 5 ans de tests et de débats nationaux pour que la politique d'évaluation des aliments génétiquement modifiés soit définie et que Calgene obtienne l'autorisation. La variété de tomate transgénique ‘Flavr Savr’ a donc effectivement commencé à être commercialisée aux États-Unis durant l'été 1994. Cependant, cette variété n'a pas connu le succès commercial escompté. Les tomates produites présentaient de trop piètres qualités organoleptiques et étaient vendues trop chères pour qu'elles puissent être concurrentielles vis-à-vis des nombreuses variétés existantes. En 1996, les semences de cette variété n'étaient plus produites. La première variété transgénique fut donc un échec commercial qui peut être imputé à :

- **une surestimation par les chercheurs du rôle de la polygalacturonase.** À l'époque, le choix des gènes clairement identifiés et utilisables pour faire de la transgénèse était très limité. En conséquence, il n'y avait que très peu de gènes candidats pour modifier la fermeté du fruit et le gène anti-sens de la polygalacturonase introduit n'a pas permis d'obtenir un fruit aussi ferme que prévu. Par ailleurs, avec l'introduction du gène *rin* et de géniteurs à péricarpe épais, la sélection classique avait abouti, à la même période, à des variétés de meilleure qualité que ‘Flavr Savr’ ;
- **un mauvais choix des variétés transformées.** Les variétés qui ont été choisies pour être transformées présentaient déjà une mauvaise qualité organoleptique. L'ajout d'un trans-gène non destiné à améliorer la qualité du fruit, n'a pas fait progresser ce caractère.

Nature des événements de transformation bénéficiant d'une autorisation de commercialisation aux États-Unis

Fermeté. La polygalacturonase est une enzyme impliquée dans la dégradation des pectines et des parois cellulaires. En inhibant l'activité polygalacturonase par une stratégie anti-sens (événement Flavr Savr, Calgene ; événement B, Zeneca Seeds) ou sens (événement Da et F, Zeneca Seeds), il est possible de créer des tomates restant fermes plus longtemps, ce qui permet de retarder d'autant la récolte.

Longue conservation par ralentissement de la maturation. La tomate est un fruit à crise climatérique dont la maturation dépend de la synthèse d'éthylène. Une stratégie pour retarder le mûrissement de la tomate consiste donc à inhiber la synthèse d'éthylène. Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été employées :

- **méthode 1 (événement 8338, Monsanto) :** des plants de tomate ont été transformés par un gène de *Pseudomonas chloraphis*, codant une acide carboxylique-1-aminocyclopropane désaminase (ACCD) sous le contrôle d'un promoteur fort. Cette enzyme inhibe la synthèse d'éthylène en catalysant le métabolisme d'un précurseur essentiel de cette hormone : l'acide carboxylique-1-aminocyclopropane (ACC) ;

– méthode 2 (événement 35 1N, Agritope Inc.) : elle repose aussi sur le principe de l'élimination d'un précurseur essentiel de la biosynthèse de l'éthylène. Des plants de tomate sont transformés par le gène du bactériophage T3 codant la S-adénosyl méthionine hydrolase (SAMase). Cette enzyme provoque une diminution drastique de la S-adénosyl méthionine (SAM), un précurseur dans la chaîne de biosynthèse de l'éthylène ;

– méthode 3 (événement 1345-4, DNA Plant Technology Corporation) : un gène tronqué de l'ACC synthase, est introduit dans des plants de tomate provoquant une suppression de l'expression de l'ACC synthase native. L'inhibition de la synthèse d'éthylène est donc obtenue en supprimant l'activité de l'ACC synthase, une enzyme essentielle dans la voie de biosynthèse de cette hormone.

Résistance aux lépidoptères (*Heliothis virescens*, *Helicoverpa zea*,...). Ces insectes sont susceptibles de causer des dégâts aux cultures de tomate de plein champ. Le gène *Cry1Ac*, provenant de *Bacillus thuringiensis*, code une delta-endotoxine, qui agit comme un insecticide, spécifiquement sur les lépidoptères. Cette protéine peut se fixer sur des récepteurs spécifiques présents sur l'épithélium de l'intestin de ces insectes. Les protéines fixées forment ensuite des canaux cationiques qui perturbent complètement le fonctionnement de l'intestin. Ces dysfonctionnements conduisent à la paralysie, puis à la mort de l'insecte. Ces endotoxines sont inoffensives pour les mammifères, car ceux-ci ne possèdent pas de récepteurs. L'innocuité de cette protéine a été vérifiée en nourrissant des mammifères et des oiseaux en laboratoire, avec de la nourriture contenant un supplément en protéines de *Bacillus thuringiensis*.

Un exemple de recherche en cours :

la production de tomates transgéniques aptes à être cultivées en sol salin

Des plants de tomates de la variété 'Moneymaker' ont été transformés avec le gène *AtNHX1* d'*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. codant une protéine fonctionnant comme une pompe « antiport » Na^+/H^+ vacuolaire. Les plantes transgéniques régénérées ont montré la faculté de pouvoir croître sur des sols riches en sel (200 mM). De plus, ces plantes accumulent le sel dans la feuille et non dans le fruit, qui reste donc comestible. Ces expériences semblent indiquer que la transgénèse permet d'obtenir des plantes capables de croître sur sols salins. Il est intéressant de noter que la sélection classique a aussi permis d'obtenir des génotypes à gros fruit, aptes à être cultivés dans des sols salins, mais à un niveau de salinité moins élevé.

Perspectives d'amélioration

Les quantités de tomates de frais produites en France, ou importées sont relativement stables depuis quelques années. La sélection de la tomate pour le marché de frais est réalisée par une vingtaine de sociétés de semences très dynamiques, qui s'emploient à produire des variétés pour l'ensemble du Bassin méditerranéen, voire le monde entier.

Plus d'une cinquantaine de variétés sont cultivées chaque année en France. Leur durée de commercialisation est relativement courte (3 à 10 ans), entraînant une évolution rapide des listes variétales. La sélection pratique de plus en plus la

diversification avec un certain nombre de types qui occupent des niches de marchés (tomate cerise, tomate allongée, etc.). La qualité organoleptique ou nutritionnelle pourrait devenir une nouvelle cible de diversification. La culture de la tomate d'industrie a, par contre, tendance à régresser d'année en année en France.

Caractères à améliorer

Qualité organoleptique. Des travaux importants ont été entrepris depuis quelques années pour améliorer la qualité organoleptique de la tomate. De nombreux outils ont été mis en place tels que l'identification de QTL des différents composants du goût de la tomate. Le gène *sucr* de *L. chmielewskii* ou le gène de *L. hirsutum* codant la grande sous-unité de l'ADP-glucose pyrophosphorylase (AGPase), la première enzyme impliquée dans la voie de biosynthèse de l'amidon, ont été introduits avec succès dans *L. esculentum* afin d'améliorer la qualité organoleptique du fruit. De plus en plus de gènes impliqués dans la qualité sont identifiés et caractérisés, ouvrant des perspectives d'amélioration.

Qualité nutritionnelle. Il existe de nombreux QTL identifiés et des gènes clonés intervenant dans la qualité nutritionnelle de la tomate. C'est le cas, par exemple, des gènes *hp* (*high pigment*, forte teneur en pigments) et *B*(β -*carotene*), carmin vieil or) qui induisent une teneur accrue en lycopène. Le lycopène est un caroténoïde qui, bien que n'étant pas un précurseur de la vitamine A, est très efficace pour piéger les radicaux libres. Sa consommation permet de diminuer les risques de certains cancers tels que ceux de la prostate, du poumon, de l'estomac ou de l'œsophage. Le sélectionneur a donc les outils nécessaires pour créer des variétés enrichies en provitamine A, en vitamine C ou en lycopène. Il pourrait aussi être intéressant de limiter le caractère allergène de la tomate : des glycoprotéines de ce fruit sont connues pour déclencher des allergies chez certaines personnes.

Résistance durable aux maladies. Les races du champignon *Fulvia fulva* (anciennement *Cladosporium fulvum*), responsable de la cladosporiose de la tomate, évoluent vite et surmontent rapidement les résistances introduites. Néanmoins, le champignon s'est relativement stabilisé depuis 1990. La race 2-4-5 est la plus fréquemment isolée depuis 15 ans. L'objectif est, à présent, de mieux gérer les résistances, qui existent en grand nombre, en introduisant au moins deux gènes (*Cf-6* et *Cf-9* notamment) non encore surmontés dans chaque nouvelle variété. Néanmoins, la tomate est aussi un exemple de l'utilisation durable de résistances monogéniques : les gènes de résistance *Tm-2²* au TMV, *Ve* au *Verticillium dahliae*, *I₁* et *I₂* au *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, *Pto* au *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*, *Sm* au *Stemphylium* spp., etc. démontrent une grande stabilité, alors qu'ils sont très largement utilisés. Par ailleurs, aucune résistance de niveau suffisant n'a été mise en évidence, ni contre le virus de la mosaïque du concombre (*Cucumber mosaic virus*, CMV), ni contre le virus Y de la pomme de terre (*Potato virus Y*, PVY). De même, la recherche de nouvelles sources de résistance au virus de l'enroulement foliaire

de la tomate (TYLCV), qui devient un danger pour les cultures sous abri en France et tout autour de la Méditerranée, se poursuit. Cependant, des mesures prophylactiques sévères conduisent à l'éradication de ces virus.

Techniques à développer

L'utilisation conjointe du marquage moléculaire et de l'hybridation interspécifique associée à une sélection au champ, est des plus prometteuses à court et à moyen termes. De nombreux programmes ayant trait à l'identification par marquage moléculaire de gènes impliqués dans des caractères tels que la qualité organoleptique ou les résistances aux maladies sont actuellement en cours.

Inscription et protection des variétés en France

1963, ouverture d'une rubrique tomate dans le catalogue officiel espèces potagères.

1973, ouverture, par arrêté ministériel, d'une rubrique particulière de variétés hybrides F₁ chez la tomate.

1997, ouverture, par arrêté ministériel, d'un registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

En 2003, 406 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français et 2 429 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Cette même année, 67 variétés étaient, de plus, inscrites sur le registre variétés anciennes pour jardiniers amateurs.

Comme pour les autres espèces potagères, il existait jusqu'en décembre 2004, une possibilité de procédure d'inscription avec autorisation provisoire de vente (APV) qui, dès son acceptation, permettait de commercialiser la variété en France. Depuis janvier 2005, comme pour les autres espèces potagères à multiplication sexuée, l'APV permet de commercialiser la variété sur le territoire de l'Union européenne.

Dans les épreuves de DHS réalisées par le GEVES, 77 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 cycles de culture. À l'issue de ces études, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour en savoir plus

- Alabouvette L. et Titard A.**, 1933. Sur la possibilité d'utiliser dans la culture de la tomate des hybrides de première génération. *Sél. fr.*, 2, 11-14.
- Anaïs G.**, 1997. La tomate. Dans : *Amélioration des plantes tropicales*. A. Charrier, éd., Ed. Repères CIRAD-ORSTOM, Montpellier, 591-605.
- Ano G., Anaïs G. et Chidiac A.**, 2002. Création de variétés résistantes aux maladies en Guadeloupe. *Phytoma. Déf. Vég.*, 551, 36-37.
- Ano G., Anaïs G., Marival P. et Chidiac A.**, 2004. L'amélioration variétale de la tomate pour les régions tropicales de plaine : travaux en Guadeloupe. *Phytoma. Déf. Vég.*, 573, 23-25.
- Blancard D.**, 1988. *Maladies de la tomate : observer, identifier, lutter*. INRA-PHM Revue horticole, Paris, 212 p.
- Bohn G.W. et Tucker C.M.**, 1940. Studies on *Fusarium* wilt of the tomato. I. Immunity in *Lycopersicon pimpinellifolium* Mill. and its inheritance in hybrids. *Missouri Agr. Expt. Sta. Res. Bull.*, 311, 1-82.
- Causse M., Caranta C., Saliba-Colombani V., Moretti A., Damidaux R. et Rousselle P.**, 2000. Valorisation des ressources génétiques de la tomate par l'utilisation de marqueurs moléculaires. *Cab. Agric.*, 9, 197-210.
- Chetelat R.T., de Verna J.W. et Bennett A.B.**, 1995. Introgression into tomato (*Lycopersicon esculentum*) of the *L. chmielewskii* sucrose accumulator gene (*sucr*) controlling fruit sugar composition. *Theor. Appl. Genet.*, 91, 327-333.
- Grasselly D., Navez B. et Letard M.**, 2000. *Tomate, pour un produit de qualité*. Ctifl, Paris, 222 p.
- Huang J., Rozelle S., Pray C. et Wang Q.**, 2002. Plant biotechnology in China. *Science*, 295 (5555), 674-677.
- Jeannequin B., Dosba F. et Amiot-Carlin M.J.**, coord. 2005. *Fruits et légumes : caractéristiques et principaux enjeux*. INRA Éditions, Paris, 115 p.
- Laterrot H.**, 1989. La tomate : intérêt et utilisation des espèces sauvages pour la création variétale. *PHM-Rev. Hortic.*, 295, 3-7.
- Laterrot H.**, 1996. Twenty near isogenic lines in Moneymaker type with different genes for disease resistance. *Report Tomato Genet. Coop.*, 46, 34.
- Laterrot H.**, 2002. Lutte génétique contre les pathogènes des légumes en cultures abritées. *Phytoma-Déf. Vég.*, 552, 29-31.
- Laterrot H. et Philouze J.**, 2003. Tomates. Dans : *Histoires de légumes. De l'origine à l'orée du XXI^e siècle*. M. Pitrat et C. Foury, coord., INRA Éditions, Paris, 266-276.
- Laumonier R.**, 1964. La tomate. Dans : *Cultures maraîchères*. J.B. Baillière et Fils éd., Paris, 90-122.
- Maliga P.**, 2001. Plastid engineering bears fruit. *Nature Biotechnol.*, 19, 826-827.
- Messiaen C.-M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R.**, 1991. Maladies de la tomate, de l'aubergine et du poivron. Dans : *Les maladies des plantes maraîchères*. INRA Éditions, Paris, 141-214.
- Mutscher M.A., Tanksley S.D. et Rick C.M.**, 1987. Linkage maps of the tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Report Tomato Genet. Coop.*, 37, 5-34.
- Péron J.-Y.**, 1999. La tomate pour le marché de frais. Dans : *Productions légumières. Références*. Éditions Synthèse Agricole, Bordeaux, 522-535.
- Péron J.-Y.**, 1999. La tomate d'industrie. Dans : *Productions légumières. Références*. Éditions Synthèse Agricole, Bordeaux, 536-543.
- Philouze J.**, 1994. Les tomates. *Sauve qui peut*, 6-7, 22-25.
- Philouze J. et Hedde L.**, 1993. La tomate. Dans : *Méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*, OCDE Édition, Paris, 95-104.

- Philouze J. et Laterrot H.**, 1992. La tomate. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 377-391.
- Philouze J.**, 1999. La tomate et son amélioration génétique. Dans : *Technologie des légumes*. Y. Tirilly et C.M. Bourgeois, coord., Éditions Tec & Doc, Paris, 111-130.
- Pitrat M.**, 2002. Un regard sur 40 ans d'amélioration des plantes maraîchères. *Sél. Fr.*, 149-156.
- Rick C.M.**, 1986. Germplasm resources in wild tomato species. *Acta Hortic.*, 190, 39-47.
- Ruf S., Hermann M., Berger I.J., Carrer H. et Bock R.**, 2001. Stable genetic transformation of tomato plastids and expression of a foreign protein in fruit. *Nature Biotechnol.*, 19, 870-875.
- Tigchelaar E.C., McGlasson W.B. et Buescher R.W.**, 1978. Genetic regulation of tomato fruit ripening. *Hortscience*, 13, 508-513.
- Zhang H.X. et Blumwald E.**, 2001. Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulate salt in foliage but not in fruit. *Nature Biotechnol.*, 19, 765-768.

Le tournesol

Helianthus annuus L. ($2n = 2x = 34$)
(Astéracées ou Composées)

Présentation de l'espèce

Le genre *Helianthus* L., caractérisé au sein des Astéracées par une absence d'aigrette sur la graine, a son origine en Amérique du Nord. La forme cultivée, *Helianthus annuus* L., se distingue des formes sauvages par un petit nombre de caractères affectant, par exemple, la tige (disparition de la ramification qui conduit à générer un gros capitule unique) et la graine (augmentation du calibre). La domestication du tournesol a débuté en Amérique du Nord. Des preuves archéologiques indiquent que les Indiens ont, en effet, cultivé cette plante, dès 3 000 ans av. J.-C., probablement pour l'extraction de matières tinctoriales de la coque (tatouage et teinture) et pour la consommation de l'amande. Le tournesol a ensuite été introduit en Europe au XVI^e siècle, *via* l'Espagne, où il a longtemps été seulement considéré comme une plante ornementale. Un inventeur anglais, Arthur Bunyan, a contribué à l'extension de la culture du tournesol en mettant au point une méthode d'extraction d'huile à partir de la graine, qui fut brevetée en 1716. C'est aux Russes que l'on doit la transformation du tournesol en plante oléagineuse de grande culture dès la seconde moitié du XVIII^e siècle. Ce n'est qu'au XIX^e siècle que la culture du tournesol a été implantée en Europe orientale, puis en Europe occidentale et enfin a retraversé l'océan Atlantique. Au milieu du XIX^e siècle, la France exporta jusqu'à 240 000 tonnes de tourteau vers le Royaume-Uni. Les programmes de sélection du tournesol ont débuté après la première guerre mondiale, en URSS où une pénurie d'huile se faisait sentir. Les travaux de sélection menés sur des variétés populations ont permis de faire progresser la teneur en huile (de 28 % en 1915 à 45 % en 1955), d'accroître l'autofertilité et également de réduire l'aptitude à l'égrenage.

En Europe de l'Ouest, l'expansion du tournesol a été retardée par les actions de développement de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) conduites outre-mer à l'initiative des entreprises coloniales. Depuis 30 ans, les variétés hybrides F₁ ont

permis de mieux exploiter la vigueur hybride. La culture du tournesol connaît régulièrement des expansions et des régressions dues aux politiques nord-américaines et européennes souvent conflictuelles.

Le tournesol est une espèce annuelle et allogame à pollinisation entomophile assurée par les abeilles et les bourdons, et multipliée par semences. Des fécondations croisées entre les plantes de deux champs de tournesol sont tout à fait possibles. C'est pourquoi, la distance minimale d'isolement pour la production de semences destinées à la commercialisation est de 500 mètres. Des croisements interspécifiques spontanés peuvent se produire avec d'autres espèces sauvages telles qu'*Helianthus petiolaris* Nutt., *H. argophyllus* Torr. & Gray (espèces ornementales), *H. tuberosus* L. (topinambour). Les possibilités de pollinisation entre tournesol et espèces sauvages subspontanées et leurs conséquences sont en cours d'études à l'INRA ainsi que la dynamique des repousses de tournesol, souvent nombreuses après une culture et persistantes.

La variabilité du tournesol cultivé n'est pas très importante, bien qu'*Helianthus annuus* ait conservé la faculté de se croiser avec de nombreuses espèces sauvages. Les *Helianthus* sauvages sont très répandus aux États-Unis. La variabilité naturelle ne semble pas en danger et ceci est d'autant plus vrai que de nombreuses prospections ont déjà été réalisées.

Les deux plus grandes collections mondiales sont situées en Russie (*N.I. Vavilov All Research Institute of Plant Industry* (VIR, Saint-Petersbourg) et aux États-Unis (*USDA North Central Regional Plant Introduction*, Station d'Ames, Iowa). Des collections importantes sont aussi basées en Europe et particulièrement, en Serbie (Novi Sad) et en Hongrie (GKI, Szeged). La France possède une collection d'espèces sauvages, entretenue à l'INRA de Montpellier (Hérault), une collection d'anciennes variétés populations ainsi qu'une collection très importante de lignées à l'INRA de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) et de Montpellier. Depuis 1998, les ressources génétiques conservées en France, en particulier les populations, sont gérées dans un réseau associant l'INRA, les sélectionneurs membres de l'Association des industries des semences de plantes oléoprotéagineuses (AMSOL) et le GEVES.

Production et utilisation

Le produit récolté est un fruit sec indéhiscent (akène) composé d'une amande ou graine et d'une coque ou péricarpe. Les graines sont groupées par quelques centaines dans un capitule. Après broyage et extraction (en général, une extraction à l'hexane est pratiquée après l'extraction par pression), on obtient l'huile et un résidu solide, le tourteau.

La production mondiale de graines de tournesol est de 26,1 millions de tonnes. La France, avec près d'1,5 million de tonnes, est le 5^e producteur mondial derrière la Russie, l'Argentine, l'Ukraine et la Chine (données FAO, 2004).

L'une des spécificités des graines oléagineuses est de fournir, après une opération de première transformation industrielle, la trituration, deux produits s'adressant à des marchés distincts : l'huile et le tourteau. La trituration comporte trois étapes :

- la pression des graines, le plus souvent à l'aide d'un pressoir à vis. Une vis sans fin entraîne les graines dans un corps légèrement conique. La pression et la température augmentent. Une grande partie de l'huile brute est extraite. Le reliquat est une pâte grasse hétérogène appelée « cake » ;
- le rinçage du « cake » par un flux d'hexane, qui permet l'extraction d'une grande partie de l'huile restante. L'huile ou le tourteau et l'hexane sont ensuite séparés par chauffage (l'hexane étant extrêmement volatile, des températures élevées ne sont pas nécessaires) ;
- la filtration et le raffinage de l'huile brute, qui permettent d'éliminer les cires, mucilages, etc.

Le tournesol est, avant tout, utilisé dans l'alimentation humaine (huile), mais il a aussi des débouchés en alimentation animale (tourteau) et dans l'industrie (huile).

Alimentation humaine. La graine de tournesol a d'abord été utilisée pour la consommation directe (tournesol de bouche), car elle a une faible teneur en huile (30-35 %). Par sélection, la teneur en huile a été augmentée, et la graine du tournesol contient maintenant de 45 à 50 % d'huile. L'huile de tournesol est l'huile la plus consommée en France depuis les années 1970. Le tournesol, sous un climat tempéré, produit une huile riche en acide linoléique, un acide gras poly-insaturé idéal pour une utilisation en huile d'assaisonnement (*cf.* encadré ci-dessous). L'huile de tournesol entre également dans la fabrication de margarine, autrefois par hydrogénation sélective et maintenant par inter-estérification de l'huile. Il existe des variétés de tournesol dont l'huile, riche en acide oléique (mono-insaturé), présente un meilleur comportement à la cuisson, par rapport à l'huile extraite de variétés classiques. Une telle huile entre dans la composition de nouvelles huiles apparues récemment sur le marché, en mélange avec l'huile de tournesol classique, l'huile de colza et l'huile de pépin de raisin.

Huile de tournesol et santé

Dès les années 1960, le lien entre l'apparition de maladies cardio-vasculaires et le taux de cholestérol dans le sang avait été clairement démontré. De même, des chercheurs avaient découvert que les acides gras saturés augmentent le taux de cholestérol tandis que les acides gras poly-insaturés le diminuent en limitant la formation de la plaque d'athérome. L'huile de tournesol est riche en acide linoléique (acide gras poly-insaturé) et à ce titre, peut être considérée comme bonne pour la santé. Cet acide gras est, de plus, essentiel car l'organisme humain ne sait pas le synthétiser. L'huile de tournesol contient aussi, en moyenne, 700 mg/L d' α -tocophérol, la vitamine E, qui, par ses propriétés anti-oxydantes, prévient également les maladies cardiovasculaires. La teneur de cette vitamine dans l'huile d'olive n'est que de 150 mg/L.

Alimentation animale. Le tourteau, co-produit obtenu après l'extraction de l'huile de la graine entière de tournesol par pression, peut être utilisé en alimentation animale. Ce résidu des graines écrasées après extraction de l'huile, contient des taux intéressants des différentes vitamines B et beaucoup de protéines riches en acides aminés soufrés. Lorsque la graine n'est pas décortiquée avant trituration, le taux de protéines du tourteau n'est que de 30 %, ce qui interdit son usage pour l'élevage intensif d'animaux monogastriques. Ce défaut explique que le tourteau de tournesol ne représente, en France, que moins de 5 % des tourteaux consommés. Il est réservé à l'alimentation du lapin, de la poule pondeuse et des ruminants. Le décorticage, qui consiste à séparer l'amande de la coque par action mécanique avant l'extraction de l'huile, permet d'obtenir un tourteau beaucoup plus intéressant avec un taux de protéines compris entre 45 et 55 %. Ce tourteau de qualité peut être utilisé dans l'alimentation des animaux monogastriques. Cependant, les huileries ne sont pas souvent équipées de décortiqueuses, ce qui limite beaucoup l'usage du tourteau de tournesol en France. Enfin, les variétés de bouche sont aussi utilisées pour l'oisellerie.

Industrie de la lipochimie. Cette industrie recherche des huiles très riches en acide oléique, qui peuvent alors être utilisées en cosmétique, en pharmacie, dans les lubrifiants, les biocarburants, dans la fabrication de matières plastiques, etc.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

'Le Gris strié de Provence', variété population de pays, tardive et très hétérogène. Le rendement en huile était de 0,8 t/ha. La teneur en huile n'était que de 30 %.

'Nain noir', variété population de pays.

1946, **'Advance'** (Agriculture Canada, Saskatoon, Canada), première variété pseudo-hybride de tournesol. Basée sur l'utilisation de l'auto-incompatibilité qui est partielle chez cette espèce, elle ne contenait qu'environ 50 % de graines hybrides. Cette tentative de variété hybride n'a jamais été cultivée en France.

1958, **'Peredovik'** (Station VNIIMK, Krasnodar, URSS), variété population améliorée semi-tardive qui a été très cultivée dans le sud de la France. Elle avait une teneur en huile de 45 %.

Années 1960, **'VNIIMK 65-40'**, **'VNIIMK 89-31'** (Station VNIIMK, Krasnodar, URSS), variétés tardives qui sont à l'origine d'un renouveau de la culture du tournesol en France. Ces variétés étaient remarquables du fait de leur facilité de décorticage : leur taux de décorticage était de 63 à 70 % alors que celui des variétés françaises était de 50 à 60 %. Le rendement en huile était environ d'une tonne par hectare.

Variétés récentes

1971, '**INRA 6501**' (INRA, France), première variété hybride F₁ de tournesol du monde. Elle a été produite à l'aide d'une stérilité mâle nucléaire (due à un gène fortement lié à un gène marqueur de coloration de l'hypocotyle), découverte en France dans une population russe 'Armavir 93-45'. Cette variété semitardive se distinguait aussi par sa résistance à la verse et au *Botrytis cinerea*.

1974, '**Remil**' (INRA, France), première variété hybride F₁ résistante au mildiou. Cette variété a permis de maintenir la culture du tournesol dans les régions infestées par le mildiou.

1975, '**Relax**' (INRA, France), première variété hybride F₁ obtenue grâce à l'utilisation d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique introduite par croisement interspécifique avec *H. petiolaris*, et d'un restaurateur de fertilité issu du même croisement interspécifique.

1977, '**Pervenets**' (Station VNIIMK, Krasnodar, Russie), première variété population riche en acide oléique (environ 65 %). Cette variété est à la base des variétés riches en acide oléique (elles en contiennent plus de 80 %).

1978, '**Mirasol**' (Gavadour-Cargill, France), première variété hybride F₁, obtenue grâce à une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique, présentant une résistance au mildiou. Cette résistance est apportée par le restaurateur de fertilité branchu utilisé qui est de provenance nord-américaine.

1984, '**Frankasol**' (Gavadour-Cargill, France), variété hybride F₁, remarquable pour sa précocité.

1987, '**Albénà**' (Institut de Tolbuchin, Bulgarie), variété hybride F₁ qui a été la plus cultivée en France pendant dix ans. Sa précocité et sa productivité sont deux qualités qui l'ont fait adopter par les agriculteurs du nord de la France. Les agriculteurs du sud ont adopté cette variété à cause de sa tolérance au *Phomopsis* du tournesol.

1988, '**Vidoc**' (Maïsadour, France / GKI, Hongrie), variété hybride F₁, semiprécoce, se distinguant par son rendement. Sa carrière commerciale s'est arrêtée du fait de sa sensibilité à la pourriture blanche (*Sclerotinia sclerotiorum*) sur bourgeon terminal et au *Phomopsis* du tournesol.

1991, '**Domino**' (Institut de Fundulea, Roumanie), première variété hybride F₁, résistante aux nouvelles races de mildiou présentes en France (races 703 et 710). Cette résistance n'a été identifiée que plus tard. La première variété officiellement reconnue comme telle a été 'Novasol' (Semences Cargill, France) inscrite en 1992.

1991, '**Lipo**' (CST, France / Safinco, Belgique), une des premières variétés hybrides F₁, inscrite au catalogue officiel français présentant une forte teneur en acide oléique.

1993, '**Santiago**' (Hilleshög NK, France / Institut de Fundulea, Roumanie), variété hybride F₁ se distinguant par une taille courte lui apportant une bonne

résistance à la verse et une résistance au *Phomopsis* du tournesol. Cette variété est très cultivée dans le Sud-Ouest, car elle est très bien adaptée aux conditions climatiques.

1996, '**Melody**' (Hilleshög NK, France), variété de type hybride F_1 , assez tardive, se distinguant par un bon rendement. Cette variété connaît un vif succès commercial avec le premier rang des ventes de semences en 2000 et 2001.

1996, '**Olstaril**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), variété hybride F_1 , à très forte teneur en acide oléique (de l'ordre de 90 %).

1998, '**Apétit**' (Pioneer Hi-Bred, États-Unis), une des deux variétés de « tournesol de bouche » présentes dans le catalogue officiel français de 2002. C'est un hybride F_1 .

1998, '**Inédi**' (INRA, France), variété hybride F_1 , se caractérisant par des résistances au mildiou et au *Phomopsis* du tournesol provenant d'un croisement interspécifique avec *H. tuberosus*. Cette variété qui est aussi tolérante à la pourriture blanche, possède une bonne teneur en huile. Elle est restée très peu utilisée, en raison du manque de régularité de son rendement.

1999, '**All-Star RM**' (IWS, Bulgarie / Rustica Prograin Génétique, France), variété hybride F_1 , précoce de bonne productivité et résistante aux différentes souches de mildiou présentes en France. Cette variété est, de plus, très peu sensible au *Phomopsis* du tournesol et peu sensible à la pourriture blanche du capitule.

1999, '**Prodisol**' (Cargill génétique Europe), variété hybride F_1 , se caractérisant par sa précocité, une résistance aux trois races de mildiou, un très bon comportement face à la pourriture blanche et au *Phomopsis* du tournesol, et une grande régularité de rendement. C'est la deuxième variété pour la vente des semences en 2000 et en 2001.

2002, '**Aurasol**' (Monsanto SAS, France), une des premières variétés hybride F_1 , riches en acide oléique, qui est résistante aux trois races de mildiou. Elle est, de plus, peu sensible au *Phomopsis* du tournesol et à la pourriture blanche. Cette variété permet de relancer la culture du tournesol oléique dans les zones infestées par les nouvelles races de mildiou.

Remarque. Le tournesol est une espèce qui se caractérise par une bonne capacité d'adaptation. Des variétés hybrides sélectionnées à l'étranger ont très bien réussi en France. Les variétés de tournesol cultivées en France sont donc d'origines très variées. La sélection, en brassant des génotypes originaires de différents horizons, en réalisant de très nombreux croisements interspécifiques et en ayant eu recours à la mutagenèse a permis d'accroître sensiblement cette diversité. Par contre, bien que de nombreux cytoplasmes mâles stériles existent, seul le cytoplasme « PET1 » est utilisé à grande échelle. Enfin, il convient de signaler que la quasi-totalité des variétés cultivées aujourd'hui comprennent des variétés russes dans leurs ancêtres.

Regard sur 50 ans de sélection

Jusqu'en 1975, les variétés cultivées dans le monde étaient des populations hétérogènes dans lesquelles il était difficile d'associer homogénéité et vigueur. Cependant, dès 1960, la culture a été relancée en Europe de l'Ouest en utilisant les nouvelles populations obtenues en Russie.

Les premières variétés hybrides F_1 ont été créées en France. Ces travaux, commencés en 1960, ont abouti à la découverte d'une stérilité mâle nucléocytoplasmique (cf. encadré p. 718). Ce système, qui autorise la création de variétés hybrides F_1 , a effectivement permis de mieux associer homogénéité, productivité, qualité et résistance à la verse ainsi qu'aux maladies.

La sélection du tournesol est marquée par une lutte acharnée contre les maladies. C'est ainsi que, 6 ans après les premières attaques de mildiou, les sélectionneurs ont obtenu des variétés résistantes qui ont permis de juguler la maladie pendant plus de 10 ans. La sélection a aussi permis de faire des progrès notables dans la tolérance au *Phomopsis* du tournesol et à la pourriture blanche du capitule et dans la résistance à de nouvelles races de mildiou. La sélection du tournesol a aussi permis de faire des bonds qualitatifs importants, notamment grâce à la création de variétés produisant une huile très riche en acide oléique.

Le renouvellement variétal est très rapide chez le tournesol, une variété n'étant généralement commercialisée que pendant cinq années seulement. C'est le signe d'un progrès rapide.

Les progrès importants obtenus s'expliquent par l'utilisation fructueuse de nombreux outils de l'amélioration des plantes : mutagenèse, croisements interspécifiques, culture *in vitro* et marquage moléculaire, qui sont venus en complément de la sélection et des tests au champ qui restent aujourd'hui à la base de la création variétale.

Caractères importants améliorés

Rendement. Un bon rendement est la principale qualité requise. En 30 ans, le gain de rendement a été de 40 %, soit un progrès annuel d'environ 1,3 % (ou 0,5 q). En 1960, le rendement moyen national était de 8,8 q/ha, alors qu'en 2000, il atteignait 25,5 q/ha. Le rendement potentiel dépasse 60 q/ha, chiffre déjà atteint dans certains essais. Le passage aux variétés de type hybride F_1 a largement contribué à l'amélioration du rendement. L'hétérosis est très importante chez cette espèce (30 à 40 %) (cf. encadré p. 718).

Résistance à la verse. La résistance à la verse des variétés récentes est quatre fois supérieure à celle des variétés créées dans les années 1970. Il est maintenant assez rare de voir des cultures versées de tournesol. Cette résistance accrue à la verse est une composante importante de la stabilisation du rendement.

Les variétés hybrides F₁ de tournesol

Les premières études, ayant conduit à la mise en évidence d'un fort effet d'hétérosis, ont été menées par les Canadiens à Saskatoon (Saskatchewan) dans les années 1940. Elles ont débouché sur des variétés pseudo-hybrides, obtenues grâce à l'exploitation de l'autostérilité. La grande difficulté de cette stratégie résidait dans la nécessité de sélectionner des parents assez autostériles pour arriver à produire un taux intéressant de semences hybrides et, simultanément pas trop autostériles, pour pouvoir quand même multiplier les parents. En conséquence, les variétés obtenues pouvaient être qualifiées de pseudo-hybrides car seulement 50 % des graines récoltées dans les champs de production de semences étaient effectivement issues d'une fécondation croisée. La variété canadienne 'Advance' était de ce type.

Le programme, développé à la Station de l'INRA de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) à partir de 1960, s'inspirait de l'expérience acquise chez le maïs (*Zea mays* L. subsp. *mays*) :

- de nombreuses lignées ont été obtenues par autofécondation de populations d'origines diverses : Russie, Europe de l'Ouest, Amérique, etc. Ce système impliquait un risque de réduction de la diversité par élimination des types autostériles, qui représentaient une fraction importante de toutes les provenances ;

- l'étude de quelques espèces d'*Helianthus* et de leurs hybrides avec le tournesol a été entreprise simultanément. Cette approche cytogénétique a apporté des informations et des matériels précieux pour l'amélioration des formes cultivées.

Une première avancée significative a été la découverte en 1962 d'une plante mâle stérile verte (à hypocotyle non anthocyané) dans une population russe 'Armavir 93-45'. Cette plante possédait un gène récessif de stérilité mâle nucléaire étroitement lié à un gène déterminant la présence ou l'absence d'anthocyane. Pour la production de semences, un semis dense de graines de tournesol pouvait donc être effectué. Les plantes mâles fertiles, qui étaient facilement repérables en raison de leur caractère anthocyané (coloration rouge), étaient éliminées au stade plantule. Les plantes restantes servaient alors de parents femelles pour la production des semences hybrides. Les premières variétés hybrides F₁ de ce type furent obtenues en France, au début des années 1970 ('INRA 6501', 'INRA 4701'). Ce système n'était pourtant pas satisfaisant. La liaison entre les caractères de stérilité mâle et d'absence d'anthocyane n'était pas totale. En effet, 1 % des plantes non anthocyanées, et donc retenues comme parents femelles, étaient mâles fertiles. Du fait de la tendance des abeilles à rester sur un même génotype, le taux de présence de semences issues de l'autofécondation du parent choisi comme femelle, dans les lots de semences de variétés hybrides, atteignait 30 %. La seconde avancée (1969) a été la découverte d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique par P. Leclercq dans la descendance d'un croisement entre *H. annuus* et *H. petiolaris*. De nombreux gènes de restauration de la fertilité ont, par la suite, été repérés. Cette stérilité mâle nucléo-cytoplasmique (appelée « PET1 ») ayant l'avantage de simplifier et de parfaitement contrôler la fécondation croisée, a entraîné une véritable révolution. Elle a permis à l'INRA de créer les premières variétés hybrides F₁, basées sur l'utilisation d'une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique ('Relax',...). Elle est, depuis, utilisée dans le monde entier. Pour éviter des problèmes comparables à ceux rencontrés chez le maïs avec le cytoplasme Texas, d'autres stérilités mâles nucléo-cytoplasmiques ont été recherchées, si bien que de nos jours, quelques dizaines sont disponibles. Mais, seule « PET1 » est répandue en raison de son efficacité, de sa stabilité et de la qualité de restauration de fertilité obtenue par le gène *Rf1*.

Résistances aux maladies

Phomopsis du tournesol (*Diaporthe helianthi*, anciennement *Phomopsis helianthi*). Cette maladie provoque le flétrissement, le dessèchement et la rupture de la tige. C'est, sans doute, la maladie qui a causé le plus de dégâts à la culture du tournesol

depuis son apparition. Elle est apparue, en 1980, en Yougoslavie et a été identifiée, pour la première fois, en France en 1986. Des résistances polygéniques ont été introduites à partir de croisements avec des variétés roumaines et par croisements interspécifiques avec *H. argophyllus* et *H. tuberosus*. Le gain en résistance à cette maladie en un peu moins de 30 ans est évalué à 35 %. Ainsi, selon le Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitain (CETIOM), en 1998, 70 % des surfaces de tournesol étaient cultivées avec des variétés très peu sensibles au *Phomopsis* du tournesol alors qu'en 1990, la majorité des variétés hybrides était sensible.

Pourriture blanche (*Sclerotinia sclerotiorum*). Ce champignon peut attaquer différentes parties de la plante : racine, base de la tige, bourgeon terminal, feuille et capitule. Les résistances utilisées sont toutes polygéniques et apparemment non spécifiques. Le gain de résistance, pour la pourriture blanche du capitule, en se référant aux notations pratiquées dans les tests CTPS, est estimé à 60 %. Une liaison entre les caractères de résistance à la pourriture blanche et de faible teneur en huile, a ralenti le progrès génétique.

Mildiou (*Plasmopara halstedii* ou *P. helianthi*). Le mildiou a été, pour la première fois, observé en France en 1966 : 80 % des champs avaient été détruits dans la région de Pont-Saint-Esprit (Gard). Les sélectionneurs ont immédiatement réagi en introduisant des résistances à partir d'*Helianthus* sauvages. À partir de 1977, toutes les variétés inscrites au catalogue officiel français étaient résistantes à la race 100 de mildiou. En 1988, deux nouvelles races de mildiou, s'apparentant aux races nord-américaines 703 et 710, sont apparues en France. Une sélection active a permis de produire, dès 1992, des variétés résistantes aux trois races de mildiou. Les variétés les plus vendues en France sont toutes résistantes aux trois races de mildiou présentes en France. La sélection assistée par marqueurs a largement contribué à la conversion rapide des variétés pour la résistance aux races de mildiou. Une quatrième race de mildiou est apparue en France en 2000, mais plus de 80 % des variétés inscrites au catalogue officiel français y sont résistantes.

Teneur en huile. La teneur en huile des variétés du début du siècle était de 30 %. Elle est passée à environ 40 % avec les populations russes de la première moitié du XX^e siècle. Une amélioration très nette de ce caractère a été observée entre les années 1970 et 1980. Actuellement, la teneur moyenne des graines de la plupart des variétés est de l'ordre de 45-50 %. Le choix d'un seuil minimal de 44 % comme condition d'inscription au catalogue officiel français et l'application d'une réfaction du prix de la graine de tournesol en culture si elle n'atteint pas ces 44 %, contribuent à expliquer cette situation. L'utilisation de la résonance magnétique nucléaire (RMN) pour mesurer le taux de lipides, rapidement et sans détruire la graine, a grandement facilité la sélection de ce caractère. Les meilleures teneurs en huile observées sont voisines de 62 %, limite biologique présumée.

Différentes précocités. Des variétés possédant des précocités différentes de date de floraison et de date de récolte ont été créées, permettant la culture de cette espèce dans de nombreuses conditions pédoclimatiques. Les variétés précoces sont en général préférées au nord de la France car elles permettent de libérer rapidement les champs pour implanter une autre culture et de s'affranchir de problèmes phytosanitaires. Les variétés plus tardives, en général plus productives, sont principalement utilisées dans le sud de la France.

Diversification

Richesse en acide oléique. L'huile des variétés classiques de tournesol contient 12 % d'acides gras saturés, 21 % d'acides gras mono-insaturés (dont environ 95 % d'acide oléique) et 67 % d'acides gras poly-insaturés comprenant essentiellement de l'acide linoléique. Elle est donc très riche en acide linoléique. Des variétés riches en acide oléique (le marché fixe la norme à au moins 80 %) ont été sélectionnées (la teneur en acide linoléique, acide poly-insaturé est réduite tandis que la teneur en acides mono-insaturés est accrue). Ces variétés sont très intéressantes pour la lipochimie : la filière industrielle souhaiterait que toutes les variétés de tournesol cultivées en jachère soient des variétés riches en acide oléique. De plus, cette huile présente de nombreux avantages pour l'alimentation humaine. Elle permet, par coupage avec de l'huile de variétés classiques ou d'autres huiles (carthame, colza, pépin de raisin), d'obtenir une huile contenant 60 % d'acide oléique, excellente pour la santé, qui se rapproche de l'huile d'olive. Pure, elle semble présenter des teneurs en anti-oxydants naturels encore supérieures à celles de l'huile de tournesol classique et son contenu en acides gras saturés atteint des niveaux extrêmement faibles, de l'ordre de 6 %. L'huile oléique est également valorisée dans les huiles « recombinaées » (type Isio 4) avec une image de produit de qualité diététique. L'acide oléique, moins sensible à l'oxydation, offre une meilleure tenue aux températures élevées de la friture. Les variétés « oléiques » sont cultivées sur 15 % de la sole française en tournesol. Elles ont maintenant un rendement similaire à celui de variétés classiques et sont résistantes aux différentes races de mildiou, au *Phomopsis* du tournesol et à la pourriture blanche.

Variétés de bouche. Des variétés ont été sélectionnées, principalement aux États-Unis, en Israël, en Europe de l'Est et en Chine pour la consommation de bouche. Ces variétés se caractérisent par la grosseur de la graine, les striures blanches de celle-ci et une faible teneur en huile.

Variétés pour l'oisellerie. Des variétés ont été spécialement sélectionnées pour la nutrition des oiseaux.

Nanisme. Des variétés de taille plus courte ont été produites de manière à faciliter le suivi de la culture et la récolte. Ces variétés sont, cependant, globalement un peu moins productives que les variétés classiques.

Aptitude au décortiquage. Des variétés plus aptes au décortiquage ont été sélectionnées. La teneur en coque d'un akène de tournesol varie de 16 à 52 %. Décortiquer la graine avant trituration présente de nombreux avantages pour l'extraction de l'huile et permet l'obtention d'un tourteau de meilleure qualité (car plus riche en protéines).

Autofertilité. Des variétés plus autofertiles, et donc plus aptes à avoir une bonne production de semences en absence d'insectes, ont été sélectionnées.

Diminution des besoins en traitements phytosanitaires. Le tournesol nécessite peu de traitements phytosanitaires par rapport à d'autres plantes de grande culture. Les désherbants restent les produits phytosanitaires les plus importants pour cette culture. Dans les zones à risque, un traitement contre le *Phomopsis* du tournesol appliqué préventivement sécurise la récolte et permet d'éviter des pertes de rendement pouvant atteindre jusqu'à 30 % du potentiel de la culture. Certaines variétés possèdent de nombreuses résistances aux parasites fongiques qui leur permettent d'être cultivées en agriculture biologique.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Un certain nombre de gènes de résistance au mildiou proviennent vraisemblablement de mutations. Cependant, l'hypothèse de leur apparition après croisements spontanés avec une autre espèce ne peut pas être exclue.
Mutagenèse induite	OUI La richesse en acide oléique ('Pervenets', génotypes bulgares...). ESSAIS Le nanisme. Un mutant nain a été obtenu à l'INRA de Dijon (Côte-d'Or). Sa sensibilité accrue aux maladies et la lenteur de sa croissance ont interdit son utilisation en création variétale.
Croisements interspécifiques	OUI (quelques exemples concernant les variétés françaises) Des gènes de résistance au mildiou provenant d'<i>H. tuberosus</i> ('Inédi', 'Ingrid',...). Une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « PET1 » provenant probablement d'<i>H. petiolaris</i> (toutes les variétés hybrides depuis 1969). Une résistance à la sécheresse provenant d'<i>H. argophyllus</i>. Une résistance au <i>Phomopsis</i> du tournesol provenant d'<i>H. argophyllus</i>. La mise au point de la technique de sauvetage d'embryons <i>in vitro</i> a été un facteur clé dans la réussite d'un certain nombre de croisements interspécifiques difficiles.
Hybridation somatique	ESSAIS La régénération d'une plantule à partir de protoplastes est techniquement possible.

suite...

... suite

Élévation du niveau de ploïdie	OUI Des plantes tétraploïdes, des plantes triploïdes et des plantes trisomiques ont été obtenues. Des formes autotétraploïdes ont été créées à partir de lignées et d'hybrides. Elles sont peu vigoureuses et très peu fertiles, mais elles ont permis, par croisements avec des plantes diploïdes, d'obtenir des plantes triploïdes, puis des plantes trisomiques qui sont viables et fertiles.
Transgénèse	1^{res} plantes transgéniques. Des tournesols transgéniques ont été réalisés depuis 1992. Essais au champ. En 2000, des tournesols transgéniques avaient fait l'objet de 12 essais au champ aux États-Unis. En France cette même année, 4 essais au champ de tournesol transgénique (introduction d'un gène de résistance au <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , venant du blé (<i>Triticum aestivum</i> (L.) Thell.) ou à un autre champignon pathogène) ont été effectués. Il n'existe pas de variété de tournesol transgénique dont la commercialisation soit autorisée dans le monde. Caractères modifiés par transgénèse. Au niveau mondial, la transgénèse est envisagée pour lutter contre les champignons pathogènes en surexprimant un gène d'oxalate oxydase (destruction de l'acide oxalique du champignon) ou des gènes de chitinase (destruction des parois du champignon). Des projets visent aussi à créer des variétés résistantes aux insectes, à améliorer la qualité des protéines en les enrichissant en méthionine et en lysine. D'autres ont trait à la modification de la composition en acides gras de l'huile ou à la production de pectines méthylées qui serviraient pour la fabrication de matières plastiques.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	ESSAIS La culture de méristèmes <i>in vitro</i> permet effectivement de multiplier végétativement le tournesol. Cette technique n'est pourtant pas employée.
Sauvetage d'embryons <i>in vitro</i>	OUI Cette technique a une application tout à fait particulière chez le tournesol. La dormance d'une graine est longue chez cette espèce puisqu'elle est en moyenne de 3 mois. Dès qu'elle atteint sa taille maximale, c'est-à-dire à partir de 10 jours après la fécondation, la graine est disséquée et l'embryon est déposé sur un milieu de culture <i>in vitro</i> ou sur du papier buvard humidifié. En évitant que la dormance ne s'installe, cette opération permet de gagner du temps en sélection. La technique de sauvetage d'embryons <i>in vitro</i> est aussi essentielle dans la réussite de certains croisements interspécifiques.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	ESSAIS Des plantes haploïdes ont été obtenues par culture d'anthers et d'ovules <i>in vitro</i> , mais les taux de réussite sont jusqu'à présent trop faibles pour permettre une utilisation en sélection.
Recours à la stérilité mâle	OUI Des stérilités mâles sont utilisées : – une stérilité mâle nucléaire liée à un gène de coloration ('INRA 6501', 'Airelle',...);

suite...

... suite

– une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique « PET 1 » ('Relax', 'Frankasol' et toutes les variétés actuelles).

Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Des variétés pseudo-hybrides ont été obtenues grâce à l'exploitation de l'autostérilité ('Advance'). L'amélioration du tournesol s'est accompagnée de la sélection d'une auto-incompatibilité sporophytique, ce qui est gênant pour faire des hybrides autofertiles.
Marquage moléculaire	OUI Les marqueurs sont utilisés pour faire de l'identification de matériel. Il existe de bonnes cartes génétiques sur lesquelles ont été identifiés de nombreux QTL, non seulement pour la teneur en huile, mais aussi pour la résistance au <i>Phomopsis</i> du tournesol et à la pourriture blanche. Des marqueurs de gènes de résistance au mildiou et des marqueurs du génome du tournesol ont été utilisés pour guider des rétro-croisements. Cette méthode a permis de convertir rapidement des variétés pour la résistance à de nouvelles races de mildiou.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale sur population en panmixie (cas des populations anciennes telles que 'Cernianka'). Toutes les lignées sont fixées (6 à 7 générations) par sélection généalogique avec filiation monograine (SSD). La sélection récurrente est aussi utilisée pour introduire des caractères particuliers (par exemple : résistance au <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> [lignée 'PSC8']). Les rétrocroisements sont couramment utilisés pour effectuer la conversion de lignées fertiles sur cytoplasme mâle stérile.
Types variétaux	Variété population. (Les variétés populations ne sont plus cultivées en France). Variété hybride F₁. L'hétérosis est importante chez le tournesol. Les meilleures lignées ont un rendement de 10 q/ha alors que celui des hybrides atteint couramment 35 q/ha. Il s'agit pour la plupart d'hybrides simples, mais il y a quelques hybrides trois-voies inscrits au catalogue officiel français.

Perspectives d'amélioration

Pour l'agriculteur, le tournesol est intéressant car c'est une culture de printemps peu exigeante en eau, qui s'intègre bien dans la plupart des rotations céréalières. Il améliore le sol et permet de diminuer les problèmes de maladies sur blé notamment (piétin-verse, échaudage,...). Le tournesol a une réputation de plante rustique qui conduit les agriculteurs à le cultiver sans irrigation, dans des terres pauvres et avec peu de traitements phytosanitaires. Dans ces conditions, le tournesol n'exprime pas tout son potentiel en terme de rendement, mais reste intéressant. Ces qualités, le progrès génétique considérable qui a été réalisé au cours des 20 dernières années ainsi que les investissements importants des

sélectionneurs dans le marquage moléculaire, laissent supposer que de grands progrès seront réalisés dans l'avenir.

Caractères à améliorer

Rendement. Une amélioration de la productivité de la plante se fera, sans doute, grâce à une meilleure connaissance de sa physiologie et, en particulier, lors des différentes étapes clés entre le semis et la récolte. Par exemple, son activité photosynthétique après la floraison est de plus en plus étudiée, car cette caractéristique semble déterminer une grande partie du rendement.

Résistance aux maladies

Pourriture blanche (*Sclerotinia sclerotiorum*). Étant donné qu'il n'existe pas de traitement phytosanitaire totalement efficace contre cette maladie, il est important d'essayer d'augmenter encore le niveau de résistance. La difficulté de la lutte contre le *Sclerotinia sclerotiorum* est que ce champignon est susceptible d'attaquer différents organes du tournesol et que, chaque type d'attaque doit être considéré comme une maladie différente.

Mildiou. Il serait très intéressant de développer une résistance durable au mildiou, car il existe des nombreuses races dans le monde. De plus, bon nombre de ces races de mildiou sont résistantes à des fongicides. Deux projets sont actuellement en cours, l'un visant à déterminer l'efficacité de plusieurs stratégies de lutte contre le mildiou (alternance de gènes, cumul de gènes, ...), l'autre visant à rechercher du matériel présentant une bonne résistance dite horizontale au mildiou.

Maladie du pied sec (*Phoma macdonaldii*). Cette maladie est apparue en France dans les années 1990. Elle provoque un dessèchement rapide du pied et peut occasionner des pertes de l'ordre de 20 %.

Teneur et composition en protéines. Augmenter la teneur en protéines serait intéressant pour rehausser la valeur du tourteau de tournesol. Malheureusement, le caractère de teneur en protéines est étroitement corrélé négativement avec celui de la teneur en huile. Le tournesol étant avant tout considéré comme une plante oléagineuse, la sélection pour ce caractère semble compromise. Par contre, des progrès dans la qualité des protéines semblent accessibles grâce à l'usage de la transgénèse. Des stratégies permettant d'augmenter les teneurs en lysine et en méthionine ont déjà été mises au point.

Teneur en huile. Depuis quelques années, la teneur en huile stagne. Une corrélation négative entre la teneur en huile et le rendement (poids de récolte) limite le progrès génétique sur ce caractère, si l'on veut maintenir la productivité actuelle.

Composition en huile. La transgénèse et l'utilisation de mutants permettent d'espérer de grands progrès dans ce domaine. Il semble possible de réaliser des

variétés à forte teneur en acides stéarique et palmitique. La mise au point de telles variétés permettrait de s'affranchir des besoins en huile de palme. Cependant, le prix de l'huile de palme étant parmi les plus bas, une telle substitution semble peu probable.

Résistance à la sécheresse. Le tournesol est considéré comme une espèce rustique. Il est souvent cultivé en absence d'irrigation. Des pertes importantes de rendement sont alors observées lorsqu'une période de sécheresse survient au moment de la floraison. La grande diversité de réponses à la sécheresse selon les variétés et les espèces sauvages permet d'espérer de grands progrès pour la résistance à la sécheresse.

Techniques à développer

Les techniques d'avenir pour l'amélioration du tournesol sont surtout le marquage moléculaire, et peut-être à plus long terme, la transgénèse, selon l'acceptabilité des variétés transgéniques par la société.

Inscription et protection des variétés en France

1968, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste spéciale de plantes oléagineuses multipliées en France en vue de leur exportation.

1971, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste provisoire de variétés de tournesol.

1979, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste B de tournesol.

En 2003, 335 variétés étaient inscrites au catalogue officiel français (277 en liste A et 58 en liste B) et 1200 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues des états de l'Union européenne. Dans les essais DHS du GEVES, 41 caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'OCVV. La durée minimale d'examen est de 2 années. Au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet par la suite de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, les témoins de

référence sont constitués de 3 variétés parmi les plus cultivées. Ces témoins sont actualisés chaque année. Une fois les propositions d'inscription faites, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Le CTPS tend à favoriser l'augmentation du rendement puisqu'une nouvelle variété doit présenter une productivité supérieure à celle des témoins pour pouvoir être inscrite au catalogue français. Le CTPS contribue également à orienter la sélection vers l'obtention de variétés à teneur en huile élevée et résistantes au mildiou, au *Phomopsis* du tournesol et au *Sclerotinia sclerotiorum*, grâce à un système de bonification.

Pour en savoir plus

- Bert P.-F., Jouan I., Tourvieille de Labrouhe D., Serre F., Nicolas P. et Vear F.**, 2002. Comparative genetic analysis of quantitative traits in sunflower (*Helianthus annuus* L.) 1. Characterisation of QTL involved in resistance to *Sclerotinia sclerotiorum* and *Diaporthe helianthi*. *Theor. Appl. Genet.*, 105, 985-993.
- Allisa A., Jonard R., Serieys H. et Vincourt P.**, 1986. La culture d'embryons isolés *in vitro* dans un programme d'amélioration du tournesol. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 302, 161-164.
- Bonjean A.**, 1986. *Tournesols de France*. UCST, Rodez, 198 p.
- Bonjean A.**, 1993. *Le tournesol. Économie, origine, histoire, écologie, sélection*. Les éditions de l'environnement, Paris, 240 p.
- Bouzidi M.-F., Badaoui S., Cambon F., Vear F. et Tourvieille de Labrouhe D.**, 2002. Molecular analysis of a major locus for resistance to downy mildew in sunflower with specific PCR-based markers. *Theor. Appl. Genet.*, 104 (4), 592-600.
- Campariol L.**, 1998. L'avenir du tournesol en questions. *Semences Prog.*, 97, 12-20.
- Cauderon Y.**, 1965. Analyse cytogénétique d'hybrides entre *Helianthus tuberosus* et *H. annuus*. Conséquences en matière de sélection. *Ann. Amélior. Plant.*, 15 (3), 243-251.
- Chaiyasut K.**, 1974. *Recherches cytogénétiques sur diverses variétés d'Helianthus annuus tétraploïdes, triploïdes et trisomiques*. Thèse de doctorat de 3^e cycle, Paris VI, 117 p.
- Chandler J.M. et Beard B.H.**, 1983. Embryo culture of *Helianthus* hybrids. *Crop Sci.*, 23, 279-280.
- Dedio W.**, 1995. Sunflower. Dans : *Harvest of gold – The history of field crop breeding in Canada*. A.E. Slinkard et D.R. Knott, éd. University Extension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, 167-172.
- Faure N., Serieys H., Cazaux E., Kaan F. et Bervillé A.**, 2002. Partial hybridization in wide crosses between cultivated sunflower and the perennial *Helianthus* species *H. mollis* et *H. orgyalis*. *Ann. Bot.*, 89 (1), 31-39.
- Fick G.**, 1975. Heritability of oil content in sunflowers. *Crop Sci.*, 15, 77-78.
- Gulya T., Sackston W., Viranyi F. et Rachid K.**, 1991. New races of downy mildew pathogen (*Plasmopara halstedii*) in Europe, North America and South America. *J. Phytopathol.*, 132, 301-311.
- Lamarque C.**, 1985. *Les maladies et accidents culturels du tournesol*. INRA Éditions, Paris, 120 p.
- Leclercq P.**, 1966. Une stérilité mâle utilisable pour la production d'hybrides simples de tournesol. *Ann. Amélior. Plant.*, 16, 135-144.
- Leclercq P.**, 1969. Une stérilité cytoplasmique chez le tournesol. *Ann. Amélior. Plant.*, 19, 99-106.

- Leclercq P.**, 1982. Études de divers cas de stérilités mâles cytoplasmiques chez le tournesol. *Agronomie*, 3, 185-187.
- Leclercq P., Cauderon Y. et Dauge M.**, 1970. Sélection pour la résistance au mildiou du tournesol à partir d'hybrides Topinambour × Tournesol. *Ann. Amélior. Plant.*, 20 (3), 363-373.
- Lu Y.H., Melero-Vara J.M., Garcia-Tejada J.A. et Blanchard P.**, 2000. Development of SCAR markers linked to the gene *Or5* conferring resistance to broomrape (*Orobanche cumana* Wallr.) in sunflower. *Theor. Appl. Genet.*, 100 (3/4), 625-632.
- Luciani A.**, 2004. Le tournesol. Dans : *Étude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture*. Rapport global, GEVES, 71-89.
- Luciano A., Kinman M. et Smith J.**, 1965. Heritability of incompatibility in the sunflower. *Crop Sci.*, 5, 529-532.
- Miller J., Zimmerman D. et Vick B.**, 1987. Genetic control of high oleic acid content in sunflower. *Crop Sci.*, 27, 923-926.
- Mokrani L., Gentzbittel L., Azana F., Fitamant L., Al-Chaarani G. et Sarrafi A.**, 2002. Mapping and analysis of quantitative trait loci for grain oil content and agronomic traits using AFLP and SSR in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 106, 149-156.
- Moule C.**, 1973. Tournesol. Dans : *Les plantes sarclées et diverses*. Éditions La Maison rustique, Paris, 75-90.
- Pioneer**, 1991. La transformation stable du tournesol. *Réussir*, 25, 49.
- Serieys H. et Vincourt P.**, 1987. Caractérisation de nouvelles sources de stérilité mâle cytoplasmique chez le tournesol. Dans : *Variabilité génétique cytoplasmique et stérilité mâle cytoplasmique* (Les colloques de l'INRA, n° 45), A. Bervillé, éd., INRA Éditions, Paris, 53-64.
- Tourvieille D., Pilorgé E., Nicolas P. et Vear F.**, 2000. *Le mildiou du tournesol*. INRA/CETIOM, Paris, 176 p.
- Vear F.**, 1992. Le tournesol. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 146-160.
- Vear F. et Miller J.**, 1993. Le tournesol. Dans : *Méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. OCDE Éditions, Paris, 105-122.
- Vear F. et Tourvieille D.**, 1984. Recurrent selection for resistance to *Sclerotinia sclerotiorum* in sunflowers using artificial infections. *Agronomie*, 4, 789-794.

Le trèfle violet

Trifolium pratense L.
(à l'état naturel $2n = 2x = 14$)
(Fabacées ou Papilionacées)

Présentation de l'espèce

Le trèfle violet (*Trifolium pratense* L.) est apprécié, comme plante fourragère depuis l'Antiquité. Le trèfle violet cultivé est probablement originaire d'Espagne. Les Espagnols ont ensuite introduit cette espèce aux Pays-Bas vers 1500. Les premières cultures de trèfle violet qui ont été réalisées dans ces deux pays remontent à la moitié du XVI^e siècle. Il a connu un grand essor en Europe au XVIII^e siècle avec l'adoption d'une diversification des assolements. Cette espèce fourragère a colonisé d'autres continents beaucoup plus récemment, tels que l'Amérique et l'Australie, où il est cultivé dans les zones tempérées humides.

Le trèfle violet est une espèce allogame à forte incompatibilité pollinique gamétophytique, à pollinisation entomophile et à pérennité courte. Il est propagé par semences. Il est pluriannuel avec une durée de vie limitée (trois ans au plus), pour partie en raison de son assez grande sensibilité au *Sclerotinia trifoliorum*. Comme les autres Légumineuses, il ne nécessite pas d'apport d'engrais azoté grâce à sa symbiose avec un *Rhizobium leguminosarum*. Le trèfle violet à l'état sauvage est présent dans toute l'Europe. Sachant que l'espèce est allogame, la pollinisation des trèfles sauvages par des trèfles cultivés est donc tout à fait possible.

La variabilité du trèfle violet est importante notamment au niveau du port, du nombre de tiges, du nombre d'inflorescences, de leur couleur ou de la pilosité. Des collections ont été constituées dans de nombreux pays. Cependant, certaines d'entre elles, comme celle rassemblant 50 ans de sélection à l'INRA, risquent de disparaître, si des moyens suffisants ne sont pas octroyés à sa sauvegarde.

Production et utilisation

Le produit récolté est la partie aérienne de la plante, de préférence au stade végétatif.

En 1996, environ 20 millions d'hectares de trèfle violet étaient cultivés dans le monde dont 8 aux États-Unis et 0,3 en France. En 2004, la surface cultivée en trèfle violet pur a été évaluée à environ 38 000 ha pour une production d'environ 0,3 million de tonnes (données Agreste, 2004). À cela il faut ajouter les surfaces cultivées en associations et les prairies semées avec du trèfle violet qui sont estimées à environ 3 fois celles des cultures pures de trèfle violet, soit environ un total de 150 000 ha. Il est aussi utilisé dans les jachères.

Le trèfle violet est un fourrage d'excellente qualité : très appétible, très digestible, il est recherché pour l'alimentation des animaux polygastriques en raison de sa productivité et de sa richesse en protéines (environ 19 %) et en énergie (UF = 0,9). Le trèfle violet possède aussi l'avantage de s'implanter facilement, notamment dans des sols acides défavorables à la culture de luzerne (*Medicago sativa* L.), d'être une bonne tête d'assolement et d'être de conduite culturale facile.

Il peut être utilisé en pâture, en foin et en ensilage. Il est facile à faner et à ensiler, l'ensilage de trèfle violet présentant une teneur élevée en protéines. Il est utilisé seul ou en association. Les trois quarts des surfaces françaises ensemencées avec du trèfle violet le sont sous forme d'association avec une graminée fourragère (le ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.) principalement). En Europe du Nord et au Canada, on rencontre l'association trèfle violet + fléole des prés (*Phleum pratense* L.) sur de grandes surfaces.

Histoire des variétés cultivées en France

Variétés anciennes

Les premières variétés étaient des populations locales, adaptées à un milieu et à un mode d'exploitation. On distinguait deux groupes distincts déterminés par les besoins photopériodiques associés à la résistance au froid :

- les variétés « à une coupe », tardives et résistantes au froid, cultivées principalement en Europe du Nord, comme '**Lucrum**' par exemple ;
- les variétés « à deux coupes », précoces et sensibles au froid, cultivées au sud, comme '**Alpilles**', par exemple.

La première étape dans l'amélioration a été une sélection massale dans ces populations locales, notamment pour la résistance aux parasites et l'adaptation à d'autres conditions climatiques et pédologiques.

Variétés récentes

1939, **‘Levan’** (Suède), première variété population de trèfle violet tétraploïde.

1965, **‘Violetta RVP’** (RVP, Belgique), variété population diploïde qui a été très cultivée et qui est toujours parmi les plus vendues en France, sa forte production de semences lui permettant un important accès au marché.

1966, **‘Tetri’** (Mommersteeg, Pays-Bas), première variété tétraploïde de trèfle violet inscrite au catalogue officiel français. C’est une variété population.

1976, **‘Temara’** (EFLP, Suisse), variété population tétraploïde se distinguant par sa très grande pérennité.

1980, **‘Diper’** (INRA, France), variété synthétique diploïde se caractérisant par sa très grande productivité. Cette variété connaît un grand succès commercial.

1982, **‘Merviot’** (RVP, Belgique), autre exemple de variété synthétique diploïde très productive. Elle a été la variété la plus vendue en 2001.

1989, **‘Vanessa’** (Station de Zurich, Suisse), variété synthétique tétraploïde issue de ‘Temara’. Cette variété a été améliorée pour sa capacité grainière.

1991, **‘Tédi’** (INRA, France), variété synthétique tétraploïde productive et pérenne.

2001, **‘Dicar’** (INRA, France), variété synthétique tétraploïde donnant de très bons résultats agronomiques (pérennité, rendement, résistance aux maladies).

2001, **‘Larus’** (Station de Zurich, Suisse), variété synthétique tétraploïde se distinguant par un très bon rendement, une excellente pérennité et une bonne résistance aux maladies, notamment à la sclérotiniose.

2001, **‘Lemmon’** (RVP / Barenbrug Maës, Belgique), variété synthétique diploïde cumulant résistances à la verse et aux maladies (en particulier à l’oïdium) avec une bonne pérennité.

2002, **‘Diadem’** et **‘Divin’** (INRA, France), variétés synthétiques diploïdes donnant de très bons résultats agronomiques (pérennité, rendement, résistance aux maladies).

2003, **‘Corvus’** (Station de Zurich, Suisse), variété synthétique diploïde donnant de très bons résultats agronomiques, en particulier pour la pérennité.

Remarque. La sélection, en réalisant des croisements entre trèfles violets de différentes origines, a permis d’accroître la variabilité des variétés cultivées en France.

Regard sur 50 ans de sélection

La sélection massale a suffi pour faire des progrès génétiques importants, notamment concernant l’adaptation pédoclimatique et la résistance aux parasites (*Rhizoctonia violacea* provoquant le rhizoctone, *Erysiphe trifolii* l’oïdium et *Fusarium* spp. la fusariose) et aux prédateurs (notamment un apion, *Apion trifolii*), grâce à la variabilité importante présente au sein de l’espèce.

Le passage aux variétés synthétiques a fait beaucoup progresser la productivité. Par ailleurs, l'introduction de la tétraploïdie, malgré la difficulté de sa mise en œuvre, a permis d'améliorer considérablement la pérennité, principal point faible de cette espèce. L'apport de la tétraploïdie pour l'amélioration de la résistance aux maladies et de l'appétibilité, a aussi été considérable, mais la production de semences des variétés tétraploïdes est restée un point faible. Ensuite, d'importants progrès dans la pérennité ont été obtenus avec les variétés diploïdes.

Caractères importants améliorés

Pérennité. C'est le principal objectif d'amélioration. Il intègre, d'une part la pérennité physiologique qui se traduit par l'aptitude de la plante à produire pendant au moins deux ans après le semis en conditions optimales et, d'autre part la résistance aux parasites (en particulier, *Sclerotinia trifoliorum* et le nématode des tiges *Ditylenchus dipsaci*). La tétraploïdisation a permis d'accroître la pérennité. Dans le cas de certaines variétés, un an a été gagné : un champ de trèfle peut alors être exploité durant 4 ans.

Rendement. Le rendement en matière sèche peut atteindre 20 t/ha. La sélection a permis de gagner 7 tonnes de matière sèche à l'hectare en 25 ans.

Aptitude à l'association avec une graminée fourragère. Le trèfle violet est le plus souvent associé avec le ray-grass d'Italie. Les variétés tétraploïdes sont particulièrement adaptées à cette association.

Résistances aux bio-agresseurs

Sclérotiniose (*Sclerotinia trifoliorum*) et *nématode des tiges* (*Ditylenchus dipsaci*). Ce sont les principales causes de la baisse de pérennité d'un champ de trèfle. La tétraploïdie apporte une solution à ces problèmes, les variétés tétraploïdes étant généralement moins sensibles que les variétés diploïdes.

Oïdium (*Erysiphe trifolii*). Des progrès constants sont obtenus dans la résistance à cette maladie.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI à l'étranger La variété belge 'Rotra RVP', obtenue par mutagenèse, se distingue par un bon rendement.
Croisements interspécifiques	AUCUNE Pourtant, des recherches ont été conduites.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI La tétraploïdisation est une voie importante d'amélioration du trèfle violet. Le doublement du stock chromosomique est couramment induit avec du protoxyde d'azote. La tétraploïdie améliore la pérennité, la résistance à la sclérotiniose et au nématode des tiges, l'appétibilité, la productivité en matière verte et la teneur en glucides solubles. En revanche, les variétés tétraploïdes ont une teneur en matière sèche un peu faible et ont une capacité grainière réduite ('Tédi'). Des recherches importantes ont été conduites sur la polyploïdisation sexuelle par la voie des diplogamètes en France et aux États-Unis.
Transgénèse	EN COURS 1^{ère} transformation génétique. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1996. Caractères étudiés. Cette stratégie est envisagée, notamment pour introduire des résistances aux maladies. Des expériences sur le trèfle blanc (<i>Trifolium repens</i> L.), espèce voisine où la transgénèse a été réalisée depuis 1987, ont permis de produire, par exemple, des plantes avec un contenu modifié en acides aminés.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Les génotypes intéressants peuvent être multipliés végétativement par éclatement, le bouturage horticole s'avérant difficile. Le sauvetage d'embryons et l'embryogenèse somatique <i>in vitro</i> sont possibles chez le trèfle violet. La multiplication végétative <i>in vitro</i> peut éventuellement être utilisée pour maintenir des génotypes élités.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE Pourtant, des stérilités mâles existent.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Il existe une auto-incompatibilité de type gamétophytique. Elle empêche la réalisation d'autofécondations. Les caractères peuvent être fixés grâce à des croisements frères-sœurs, processus plus lent et avec lequel certains croisements sont impossibles. L'allèle <i>Sf</i> qui confère une autofertilité est une alternative utilisable pour fixer les caractères. L'auto-incompatibilité est, par contre, un atout pour la réalisation des polycross en vue de l'obtention de variétés synthétiques.

suite...

... suite

Marquage moléculaire	ESSAIS Des marqueurs de gènes de résistance au <i>Sclerotinia</i> ont été identifiés, mais n'ont probablement pas encore été utilisés en sélection assistée par marqueurs.
MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX	
Méthodes et schémas de sélection	Sélection massale Des familles consanguines sont obtenues après 5 à 6 générations de croisements frères-sœurs. Elles sont testées pour leur aptitude générale à la combinaison. Ces familles sont ensuite intercroisées afin de réaliser des variétés synthétiques.
Types variétaux	Variété population Variété synthétique constituée de 4 à 26 familles, chacune fortement consanguine.
	ESSAIS Variété hybride double. Des hybrides doubles ont été réalisés dans les années 1970 aux États-Unis, mais cette voie n'a pas été poursuivie en raison de leurs faibles performances.

Perspectives d'amélioration

Le trèfle violet a un certain nombre d'atouts car, en plus de fournir un fourrage abondant et de qualité, il supporte des sols acides et peu profonds défavorables à d'autres plantes fourragères et pourtant caractéristiques des zones d'élevage. Ses principales qualités restent sa capacité à être cultivé avec des doses d'intrants très faibles et l'absence de complément nécessaire en tant que fourrage. La culture du trèfle violet est donc particulièrement bien adaptée à l'agriculture raisonnée et son développement pourrait être relancé.

Caractères à améliorer

- Production grainière.** En France, en 2001, 92 % des semis ont été effectués avec des variétés diploïdes. La mauvaise production grainière est la principale cause du manque de succès des variétés tétraploïdes. Cette caractéristique est particulièrement importante pour un accès au marché des semis de jachères où le prix des semences est un critère primordial.
- Résistance aux stress abiotiques.** Des résistances à la sécheresse (en liaison avec la pilosité de la plante) et au froid (une grande diversité existe) sont recherchées.
- Rendement.** L'augmentation des rendements en matière verte, matière sèche et en protéines reste un objectif important pour améliorer la compétitivité de l'espèce.
- Pérennité.** Une meilleure résistance aux maladies, et notamment à la sclérotiniose et à l'oïdium, ainsi que l'utilisation de la tétraploïdie, devraient améliorer la pérennité des variétés.

Gamme de précocité. La période de début de floraison des différentes variétés françaises dure plus de 15 jours. En considérant les types européens extrêmes, dont le début de floraison s'étale sur 2 mois, des progrès rapides sont envisageables pour les types français.

Limitation des phénomènes de météorisation. Il est nécessaire d'attendre que la rosée ait disparu avant de faire pâturer les champs de trèfle par les animaux et de limiter la durée de consommation, pour éviter la météorisation (ballonnement du ventre des animaux, dû à des gaz issus de la fermentation). Il serait intéressant de développer des variétés moins sensibles à une telle fermentation.

Inscription et protection des variétés en France

1961, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue plantes fourragères avec création des listes A et B.

En 2004, 35 variétés étaient inscrites au catalogue français (dont 31 en liste A) et 156 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, de nombreux caractères morphologiques ou physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 3 années. À l'issue de ces 3 années d'examen, au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique (VAT) requis. Ainsi, la variété est testée pendant 3 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistances aux maladies et accidents climatiques). Les lots sont réalisés en comparaison de témoins de référence avec deux témoins diploïdes et un ou deux témoins tétraploïdes. Cette liste de témoins est actualisée chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Pour en savoir plus

Berthaut J., 1965. Obtention de trèfle violet tétraploïde. Quelques essais d'amélioration des techniques de doublement. *Ann. Amélior. Plant.*, 15 (1), 37-51.

- Delclos B. et Raynal G.**, 1997. A simple method for the evaluation of red clover (*Trifolium pratense* L.) resistance to *Sclerotinia trifoliorum*. *Euphytica*, 93, 173-179.
- GNIS**, 2000. *L'amélioration des plantes fourragères*. Collection : Agriculture et sélection végétale. Cédérom édition GNIS, Paris.
- Guy P., Leconte D. et Mousset-Déclas C.**, 1989. Les variétés de légumineuses de demain pour les régions atlantiques et continentales. *Fourrages*, 119, 281-297.
- Huyghe C.**, 2002. 40 ans d'amélioration des espèces fourragères pérennes : acquis et perspectives. *Sél. Fr.*, 53, 41-54.
- Huyghe C.**, 2005. *Prairies et cultures fourragères en France : entre logiques de production et enjeux territoriaux*. INRA Éditions, Paris, 224 p.
- Mousset-Déclas C.**, 1990. Revue bibliographique sur l'hybridation interspécifique chez les trèfles. *Fourrages*, 121, 79-87.
- Mousset-Déclas C.**, 1992. Le trèfle violet. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 339-348.
- Mousset-Déclas C.**, 1993. Le trèfle violet : quels progrès pour l'agriculteur français? *Fourrages*, 134, 155-158.
- Mousset-Déclas C.**, 1995. Le trèfle violet ou *Trifolium pratense* L. Dans : *Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon*. J.-M. Prosperi, P. Guy et F. Balfourier, éd., INRA Éditions et BRG Éditions, Paris, 184-190.
- Mroginski L.A. et Kartha K.K.**, 1984. Tissue culture of legumes for crop improvement. *Plant Breed. Rev.*, 2, 215-264.
- Page D., Delclos B., Aubert G., Bonavent J.-F. et Mousset-Déclas C.**, 1997. *Sclerotinia* rot resistance in red clover : Identification of RAPD markers using bulked segregant analysis. *Plant Breed.*, 116, 73-78.
- Picard J.**, 1966. Les variétés de trèfle violet. *Fourrages*, 27, 12-17.
- Picard J.**, 1969. Les variétés de trèfle violet. *Cultivar*, 8, 14-15.
- Picard J.**, 1975. Le trèfle violet et ses variétés. *Fourrages*, 64, 139-144.
- Picard J., Maizonnier D. et Berthaut J.**, 1970. Le manque de fertilité chez le trèfle violet auto-tétraploïde. *Ann. Amélior. Plant.*, 20 (14), 389-406.
- Quesenberry K.H., Wofford D.S., Smith R.L., Krottje P.A. et Tcacenco F.**, 1996. Production of red clover transgenic for neomycin phosphotransferase II using *Agrobacterium*. *Crop Sci.*, 36 (4), 1045-1048.
- RAGT**, 1999. *Le mémento de l'herbe*. Document RAGT, Rodez, 53 p.
- Raynal G., Gayraud P., Mousset-Déclas C. et Serpeille A.**, 1991. Possibilité de lutte contre la sclérotiniose du trèfle violet. *Fourrages*, 127, 335-344.
- Sharma S.B., Hancock K.R., Ealing P.M. et White D.W.R.**, 1998. Expression of a sulfur-rich maize seed storage protein, delta-zein, in white clover (*Trifolium repens*) to improve forage quality. *Mol. Breed.*, 4 (5), 435-448.

Le triticales

x *Triticosecale* Wittm. ($2n = 6x = 42$,
 $2n = 8x = 56$ et $2n = 4x = 28$)
(Poacées ou Graminées)

Présentation de l'espèce

Le premier hybride blé × seigle a été créé et décrit en Écosse (Royaume-Uni) par A.S. Wilson en 1875. Cet hybride était stérile. En 1888, W. Rimpau a observé, en Allemagne, le premier triticales spontané partiellement fertile. La connaissance de l'existence de ces croisements spontanés entre le blé tendre (*Triticum aestivum* (L.) Thell.) et le seigle (*Secale cereale* L.) et la volonté de combiner la qualité du blé tendre avec la rusticité et la résistance au froid du seigle ont donné l'idée à certains chercheurs de tenter l'hybridation de ces deux espèces (cf. encadré p. 738). Le triticales est donc une espèce créée par l'homme.

Le triticales (× *Triticosecale* Wittm.), en tant qu'espèce cultivée, a été développé en France à partir des années 1980. Il représente un gain en biodiversité. Cette espèce est actuellement cultivée dans plus de 25 pays.

Le triticales est une espèce autogame, multipliée par semences. C'est une céréale annuelle qui se reproduit à plus de 95 % par autofécondation. Il produit cependant un pollen abondant pouvant polliniser d'autres plantes de triticales (l'un de ses parents, le seigle, est un allogame strict), les risques d'allofécondation ne sont donc pas négligeables. En revanche, l'hybridation naturelle avec d'autres Triticinées sauvages ou cultivées, est bien moins probable ; en outre les hybrides éventuels ont une fertilité faible ou nulle.

Il existe des collections de ressources génétiques de triticales, en particulier au CIMMYT, à Mexico (Mexique). La collection et la base de données européennes ECP/GR sont maintenues au Centre de Recherches de Changins (Suisse).

Une nouvelle espèce issue de la cytogénétique : le triticales

À partir de 1937, la découverte des propriétés mitoclasiques de la colchicine par P. Gavaudan, a permis de créer systématiquement des triticales octoploïdes en partant de croisements (blé tendre × seigle). Des triticales hexaploïdes, issus de croisements (blé dur (*Triticum durum* Desf.) × seigle), ont été obtenus à partir de 1948 par le chercheur nord-américain J.G. O'Mara, notamment. Ces divers triticales étaient fertiles, mais aucun n'était cultivable : leur rendement était beaucoup trop faible et ils n'étaient pas très stables sur le plan chromosomique. C'est le croisement entre triticales octoploïdes et triticales hexaploïdes qui a permis de créer des formes hexaploïdes d'un rendement à peu près normal : les triticales actuellement cultivés dérivent de ce schéma.

En France, après quelques tentatives en 1938, un programme a été mis en œuvre en 1958 à la Station INRA de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) dans l'optique suivante :

- d'une part, utiliser des lignées consanguines de seigle précédemment obtenues dans cette Station. Il s'agissait de lignées courtes supportant bien l'homozygotie et ne présentant aucune incompatibilité ;

- d'autre part, hybrider ces lignées avec des lignées courtes et précoces de blé tendre d'origines diverses. Une première série de triticales octoploïdes originaux a ainsi été obtenue, dont T 204 (lignée de blé tendre 'Frontana' × 'Étoile de Choisy' n° 28 × lignée de seigle n° 10). Ce triticales a été ensuite croisé avec le triticales hexaploïde 'Fasgro' (T 847) obtenu en Amérique du Nord et la lignée hexaploïde 'Clercal' dérive de ce croisement. Diffusée à partir de 1979, 'Clercal' a connu le succès en culture. Il a permis, avec la variété hexaploïde 'Lasko', d'établir le triticales parmi les espèces cultivées en France.

Le triticales est une céréale qui se distingue surtout par son aptitude à supporter de nombreux stress biotiques (maladies) et abiotiques (froid, excès d'eau, fortes températures, etc.). Il assure en outre un excellent rendement en paille.

La création du triticales s'est beaucoup appuyée sur les progrès réalisés en cytogénétique. Des dénombrements chromosomiques ont, en effet, dû être réalisés, notamment pour contrôler le niveau de ploïdie et suivre le retour à la régularité des méioses. La cytogénétique a aussi permis de détecter des plantes présentant des cas d'aneuploïdie, des remaniements ou des substitutions chromosomiques.

Production et utilisation

Le produit récolté est principalement le grain, un caryopse (fruit sec indéhiscent), constitué d'une graine et de tégléments.

La production mondiale de triticales est de 13,8 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont l'Allemagne et la Pologne (3,3 millions de tonnes), la France (1,8 million de tonnes) (données FAO, 2004).

Le triticales est, avant tout, une céréale destinée à l'alimentation animale. Le grain du triticales est un aliment très énergétique, notamment pour les bovins, le porc et dans certains cas, pour les volailles (il faut veiller dans ce cas à utiliser des variétés dont le grain donne une pâte avec un indice de viscosité faible, ce qui correspond à un grain pauvre en arabino-xylanes). Le triticales peut aussi être pâturé ou consommé sous forme ensilée. La paille du triticales est abondante, mais d'une efficacité comme litière jugée inférieure à celles du blé et de l'orge (*Hordeum vulgare* L. ssp. *vulgare* L.).

Il est possible que le triticale soit un jour utilisé en brasserie ou pour la production d'éthanol ou pour la panification.

Histoire des variétés cultivées en France

Années 1970, **'Armadillo'** (CIMMYT, Mexique), variété remarquable, car c'est la seule qui porte une substitution spontanée d'un chromosome R de seigle par un autre du génome D du blé tendre (substitution 2R/2D).

1983, **'Clercal'** (INRA, France), première variété de triticale inscrite au catalogue officiel français. 'Clercal' avait un rendement pouvant dépasser 80 q/ha tandis que les géniteurs de cette variété, T204 et T 847, avaient respectivement un rendement de 20 q/ha et 30 à 50 q/ha. Malgré sa difficulté de battage, cette variété a connu un bon succès commercial.

1983, **'Lasko'** (Dankow-Laski, Pologne), variété présentant un bon niveau de résistance au froid. Cette variété est, de plus, facile à battre et a été une réussite commerciale.

1983, **'Triticor'** (Ciba-Geigy, France), variété à paille courte de type printemps (cas assez rare en Europe, où les variétés de triticale sont très majoritairement de type hiver, avec quelques variétés à développement alternatif).

1987, **'Newton'** (Plant Breeding Inst., Royaume-Uni / PBIC, Royaume-Uni), variété ayant connu un bon succès commercial du fait d'un rendement élevé en grain et en paille.

1988, **'Magistral'** (INRA, France), variété se caractérisant par un poids de mille grains très élevé. Cette variété a aussi connu un succès commercial notable.

1990, **'Domital'** (INRA, France), variété dont le grain se caractérise par un indice de viscosité de la pâte assez faible, élément favorable en alimentation animale, notamment pour les volailles. Cette variété est originale car issue d'un croisement triticale × blé tendre.

1992, **'Trimaran'** (Desprez Veuve et Fils, France), variété possédant un potentiel agronomique élevé et un bon niveau de résistance à la verse. Ces qualités lui ont valu de connaître un succès commercial de 1993 à 2001, interrompu par sa sensibilité à une nouvelle race de rouille brune.

1992, **'Aubrac'** (RAGT, France), variété très résistante au froid, qui a été assez cultivée.

1993, **'Olympus'** (Semundo UK, Royaume-Uni), variété se distinguant par sa résistance à la germination sur pied.

1993, **'Colossal'** (INRA, France), variété présentant une grande facilité de battage, une grande rusticité, un haut rendement et une bonne résistance à l'échaudage. Elle a été sélectionnée directement dans du matériel F₂ originaire du CIMMYT.

1994, **‘Calao’** (INRA, France), variété très fertile, productive et souple, un peu desservie par un poids de 1 000 grains un peu faible.

1995, **‘Ampiac’** (RAGT, France), variété à paille courte et productive alliant une bonne résistance à la verse, au piétin-verse et au froid.

1996, **‘Carnac’** (RAGT, France), variété qui est une réussite commerciale, du fait du progrès qu’elle représente pour la résistance à la verse et à la rouille jaune. En 2003, c’était la deuxième variété la plus cultivée.

1998, **‘Tricolor’** (Desprez Veuve et Fils, France), variété la plus cultivée en 2001 et 2002. Elle est résistante aux races actuelles de rouille brune et de rouille jaune et présente une assez bonne résistance au froid et à la verse.

1998, **‘Rotego’** (Svalof-Weibull, Suède), variété très productive avec une assez bonne résistance à la germination sur pied.

1998, **‘Kador’** (Station de Changins, Suisse), première variété hybride de triticales. Cette variété n’est pourtant pas développée car l’agent d’hybridation Croisor® n’est pas homologué pour cette espèce.

2000, **‘Bellac’** (RAGT Semences, France), variété témoin CTPS de bonne productivité.

2001, **‘Auriac’** (RAGT Semences, France), variété productive et tolérante au piétin-verse, originale par sa forte production en paille.

2001, **‘Bienvenu’** (Lemaire-Deffontaines, France), variété très précoce.

Remarque. Cette espèce ayant été créée artificiellement, le sélectionneur est obligé de créer lui-même la variabilité. La réalisation de triticales primaires, formant la base à partir de laquelle la sélection est faite, s’est ralentie à partir de 1990. Pour relancer la création de variabilité, le GIE Triticale a été formé en 1995, en partenariat avec l’INRA, notamment. Le triticales ayant supplanté le seigle dans les zones de demi-montagne où ce dernier était traditionnellement cultivé, il est vraisemblable que la diversité génétique du seigle va marquer le pas en France. Mais, la sélection du seigle est maintenue en Allemagne, en Pologne, etc.

Regard sur 50 ans de sélection

La première variété performante de triticales a été inscrite en 1983. Dans un premier temps, le triticales est apparu comme une plante rustique qui a remplacé le seigle. Puis, le rendement des meilleures variétés a grandement progressé. On est donc passé d’une plante rustique à une plante de culture intensive qui remplace progressivement l’orge dans les zones d’élevage de l’Ouest et le seigle dans les zones de demi-montagne du Massif central. Aujourd’hui, le triticales a un rendement au moins aussi élevé que celui du blé dans les mêmes conditions climatiques, tout en nécessitant beaucoup moins d’intrants. Ces progrès remarquables ont été effectués malgré la difficulté et la longueur des programmes de sélection de cette espèce (*cf.* encadré ci-contre).

L'accroissement de la variabilité chez le triticales

La sélection du triticales est particulière en raison de la faible variabilité génétique disponible dans l'espèce. Cette situation provient du nombre assez limité de triticales obtenus en quelques décennies seulement. Il est donc nécessaire de créer une nouvelle variabilité et pour cela de recourir à de nouvelles introgressions de gènes depuis les espèces parentes, le blé et le seigle, ou de recourir à des croisements (triticales $\times$ blé tendre) ou (triticales $\times$ seigle). Ceci requiert, chaque fois, une dizaine d'années de travail et plusieurs étapes.

Création de blé tendre compatible. La plupart des blés occidentaux sont incompatibles en croisement avec le seigle. Le croisement direct peut être tenté, mais les taux de nouaison et de fertilité sont extrêmement faibles ou nuls. C'est pourquoi une approche possible consiste à rendre le blé tendre compatible en croisement avec le seigle pour obtenir une nouaison satisfaisante des grains descendants hybrides (blé $\times$ seigle) récoltés sur les parents femelles blé, pollinisés par le seigle. Pour cela, il convient de transférer un ou deux des deux allèles récessifs de compatibilité situés aux locus *kr1*, *kr2* et *5kr* des chromosomes 5B et 5A. Une variété asiatique de blé, inadaptée dans nos régions, 'Chinese Spring', peut être utilisée en croisement avec des blés européens pour y introduire ces gènes de compatibilité. Cependant, on dispose maintenant aussi d'autres sources génétiques de compatibilité mieux adaptées : 'Courtot compatible', 'Deucendeu', 'Norin 29' et 'Roazon', notamment. Rendre un blé tendre compatible nécessite, en pratique 6 à 7 ans, compte tenu de la récessivité du caractère de compatibilité introduit. Il est envisageable d'utiliser un peu plus tôt du matériel hybride (compatible $\times$ incompatible) encore en disjonction pour de nombreux caractères.

Création de triticales primaires. Un blé tendre compatible (génome : [ABD/ABD]) est alors croisé avec un seigle (génome [R/R]) de manière à obtenir, après traitement à la colchicine pour doubler le nombre de chromosomes de l'hybride [ABDR], l'amphiploïde [ABDR/ABDR] qui constitue un triticales primaire (blé tendre $\times$ seigle) octoploïde. De la même manière, un blé dur, *Triticum durum* (génome [AB/AB]) peut aussi être croisé avec un seigle [R/R] pour faire des triticales primaires hexaploïdes [ABR/ABR]). Le recours au sauvetage d'embryons par culture *in vitro* est, dans ce cas, nécessaire. Le temps pour réaliser ces croisements et choisir les meilleurs individus est compris entre 2 et 3 ans, au moins.

Croisement entre triticales primaires et triticales améliorés. Les triticales octoploïdes [ABDR/ABDR] (blé tendre $\times$ seigle) sont souvent hauts, inadaptés, grossiers, et partiellement ou très fortement stériles. L'expérience a montré qu'il fallait les recroiser avec des triticales améliorés hexaploïdes [ABR/ABR] pour les utiliser valablement en sélection. Les hybrides obtenus [ABDR/ABR] sont instables mais, en deux ou trois générations, les chromosomes du génome D peuvent être éliminés. Les triticales obtenus finalement sont donc hexaploïdes [ABR/ABR] avec un cytoplasme de blé tendre : c'est la formule génomique (analogue à celle du blé tendre) qui s'est montrée la plus apte à fournir des génotypes de triticales présentant un potentiel agronomique, de fertilité et d'adaptation, optimal. Au contraire, on n'est jamais parvenu, malgré des efforts importants de sélection, à obtenir des triticales octoploïdes agronomiquement satisfaisants.

Dans certains cas, des chromosomes du génome D du blé tendre peuvent se substituer à leurs homéologues du génome R du seigle ou connaissent des translocations sur des chromosomes du même génome R. Les triticales porteurs de chromosomes ou de parties de chromosomes du génome D sont souvent intéressants car ils présentent, en général, une meilleure qualité technologique pour la panification.

Sélection chez le triticales. Les triticales sont ensuite évalués et sélectionnés pendant de nombreuses années (plus de 6 ans) sur des caractères agronomiques et technologiques. Les lignées de triticales obtenues constitueront un matériel de départ précieux pour la sélection, ou pourront même, dans les meilleurs cas, constituer directement une variété susceptible d'être inscrite au catalogue officiel.

Caractères importants améliorés

Rendement. Le rendement est un critère prioritaire pour les céréales. Entre 1983 et 1999, le niveau de productivité des meilleures variétés de triticales est passé de 83 q/ha à 120 q/ha. Le rendement du triticales atteint celui du blé, lorsqu'il est cultivé dans les mêmes conditions. Cependant, en règle générale, le triticales est utilisé pour valoriser des terres impropres à la culture du blé et ayant un niveau d'intensification moindre que ce dernier. Le rendement moyen du triticales est donc en pratique inférieur à celui du blé tendre.

Qualité du grain. Les premières variétés de triticales connaissaient de sérieux problèmes de germination sur pied et le grain était systématiquement échaudé. La sélection a permis de diminuer très fortement l'échaudage physiologique spontané du grain (en l'absence de causes climatiques), mais des progrès importants demeurent à accomplir pour résoudre le problème de la germination sur pied.

Rendement en paille. Pour les éleveurs notamment, le rendement élevé en paille du triticales assure un avantage par rapport à d'autres céréales comme le blé ou l'orge. Les variétés de triticales peuvent produire jusqu'à 7-8 tonnes de matière sèche de paille à l'hectare.

Résistance à la verse. Les nouvelles variétés sont beaucoup plus résistantes à la verse que 'Clercal', notamment grâce à une diminution de la longueur de la tige et à une rigidification du chaume.

Résistance au froid. Des variétés beaucoup plus résistantes que 'Clercal' sont désormais disponibles. Ces variétés peuvent supporter des températures de -35°C .

Facilité de battage. Les premières variétés de triticales comme 'Clercal' étaient très difficiles à battre. Les grains étaient, en effet, enveloppés de glumes grandes et très dures. La sélection a permis d'améliorer considérablement ce caractère.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	AUCUNE Mais, l'exploitation d'une mutation spontanée est concevable.
Mutagenèse induite	ESSAIS en France Des expériences de mutagenèse ont été réalisées à l'INRA de Dijon (Côte-d'Or), mais le matériel obtenu n'a pas été utilisé pour créer des variétés.
Croisements interspécifiques	OUI Une des missions du GIE Triticale est d'obtenir des triticales primaires en réalisant des hybridations blé tendre × seigle ou blé dur × seigle.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Les variétés françaises de triticale sont toutes hexaploïdes. Diverses équipes ont réalisé des génotypes tétraploïdes, mais ce matériel n'est pas d'un niveau agronomique suffisant. Les Chinois ont consacré des efforts importants à la stabilisation des triticales octoploïdes. Au CIMMYT notamment, un travail est conduit pour réaliser des mixogénomes, afin d'ajouter le génome D (ou au moins quelques chromosomes de ce génome), pour créer des variétés destinées à l'alimentation humaine.
Transgénèse	ESSAIS La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1995. Elle reste peu utilisée, jusqu'à présent, pour l'amélioration du triticale.
MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	ESSAIS La multiplication végétative est possible <i>in vitro</i> , soit par embryogenèse somatique, soit par organogenèse. Cette possibilité n'a pas encore trouvé d'application en création variétale.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	OUI Il est plutôt plus facile d'obtenir des plantes haploïdes par culture d'anthers <i>in vitro</i> chez le triticale que chez le blé. Cependant, la réussite de cette technique est très dépendante du génotype, ce qui limite son emploi en routine dans la création variétale.
Recours à la stérilité mâle	OUI Des gamétocides (par exemple, Croisor®) sont utilisés pour induire chimiquement une stérilité mâle afin de produire des variétés de type hybride F ₁ . L'utilisation de différentes espèces (<i>Triticum timopheevi</i> (Zhuk.), <i>Aegilops squarrosa</i> L. et <i>A. ventricosa</i> Tausch.) a également fait l'objet de travaux en France, en Allemagne et en Pologne pour induire une stérilité mâle nucléo-cytoplasmique, dans ce même but.
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE

suite...

... suite

Marquage moléculaire	OUI
	Un programme commun GIE Triticale/ INRA vise à identifier des marqueurs des gènes de compatibilité en croisement interspécifique. Le triticale pourra certainement bénéficier des programmes de marquage moléculaire sur le blé.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection généalogique ('Clercal', 'Ampiac'...) Sélection par filiation monograine (SSD) Sélection généalogique différée (ou méthode <i>bulk</i>) ('Colossal') Initialement, les variétés étaient obtenues par des croisements entre triticales primaires de type (blé tendre × seigle) et (blé dur × seigle) ('Clercal') et par des croisements triticale × blé tendre ('Domital'). Désormais, la majorité des nouvelles variétés de triticale provient de descendance de croisements entre triticales hexaploïdes améliorés. De multiples autres possibilités s'ouvrent au sélectionneur. Des croisements (triticale × seigle) pourraient donner de bons résultats malgré la difficulté d'obtenir une descendance fertile. La réalisation de croisements [(blé tendre × blé dur) × seigle] apparaît aujourd'hui comme une des méthodes les plus efficaces pour obtenir des substitutions D/R.
Types variétaux	Lignée pure Hybride F₁. L'effet d'hétérosis est de l'ordre de 10 % chez le triticale. Le triticale a un important avantage par rapport au blé pour la production d'hybrides F ₁ : il produit beaucoup de pollen. Cependant, l'absence d'homologation des agents chimiques d'hybridation, l'importance économique modeste de cette espèce et le fait que des progrès significatifs soient encore obtenus par simple amélioration des lignées, font que la plupart des programmes de création de variétés de triticale hybride n'ont pas été poursuivis.

Perspectives d'amélioration

Le triticale est une espèce rustique requérant l'utilisation de moins d'intrants que les autres céréales. C'est une des cultures qui nécessite le moins de phosphore et de potassium. Le triticale ne demande pas beaucoup d'azote, mais un déficit en cet élément peut se traduire par une baisse du rendement et du taux de protéines. Un traitement antifongique est généralement requis pour éviter le développement de maladies telles que la rouille brune et la septoriose. Dans le Massif central et plus au sud, les traitements antifongiques ne sont généralement pas nécessaires. La rusticité du triticale lui confère un grand intérêt dans les programmes d'agriculture raisonnée et elle retient également beaucoup l'attention des praticiens de l'agriculture biologique. Le développement de cette culture, en remplacement d'autres plus gourmandes en intrants, a donc un impact positif sur l'environnement. Son extension est toutefois un peu freinée par l'étroitesse du marché à la vente (en dépit d'un décollage dans certaines régions comme l'Ouest) et par les prix proposés au producteur se situant à un niveau le plus souvent significativement inférieur à celui d'un blé tendre, notamment de bonne valeur boulangère.

Caractères à améliorer

Qualités nutritionnelles du grain pour l'alimentation animale. La composition du grain de triticales est proche de celle du grain de blé. La supériorité de teneur en protéines du grain, apparente chez les premières variétés de triticales avec un potentiel de rendement encore inférieur à celui du blé tendre, n'est plus évidente chez les variétés de dernière génération. Le triticales a également été crédité d'une composition en acides aminés plus équilibrée, notamment la lysine et certains acides aminés soufrés (méthionine et cystéine) à des taux respectivement de 20 % et 10 % supérieurs à ceux du blé, mais ceci est à suivre et à confirmer chez les variétés récentes. Le triticales peut être utilisé avec succès dans l'alimentation des animaux monogastriques, car il permet de réduire dans une certaine mesure l'apport de complément protéique. Le triticales est aussi dépourvu des facteurs antinutritionnels présents dans le seigle. En dépit de tous ces avantages, la qualité nutritionnelle du grain de triticales peut encore être améliorée. En particulier, l'abaissement de l'indice de viscosité de la pâte se justifie, surtout pour les volailles. Il en est de même de l'activité phytasique totale dans le grain, qui est déjà élevée, ce qui permet de mieux valoriser le phosphore du grain tout en limitant la pollution par les effluents animaux. Cette activité phytase pourrait être prise encore davantage en compte. La qualité des protéines, c'est-à-dire la composition en acides aminés, pourrait également devenir un objectif de sélection plus affirmé.

Adaptation à l'alimentation humaine. Il devrait être possible de créer des variétés pour la panification, la biscuiterie et la brasserie. En panification, le triticales est plus facile à travailler que le seigle. La création de variétés de triticales portant certains chromosomes (notamment le 1D) du génome D (mixogénome) est envisagée pour améliorer le caractère panifiable de cette espèce. Une variété porteuse d'une simple substitution 1D/1R serait probablement tout à fait panifiable. En brasserie, l'usage du triticales pourrait se justifier par la recherche de saveurs originales.

Amélioration de la paille. En zone d'élevage, le rendement en paille et sa qualité sont des critères importants qui devraient être pris en compte en sélection. La paille de triticales a une efficacité en tant que litière qui peut être améliorée.

Résistance à la verse. Elle peut être encore améliorée, notamment par l'utilisation de gènes de demi-nanisme présents chez le blé et le seigle.

Adaptation à l'industrie. La réalisation de variétés spéciales pour l'amidonnerie pourrait présenter un certain intérêt. Par ailleurs, l'emploi du triticales pour la production d'éthanol est envisagé en Allemagne. La présence d'une certaine variabilité chez le triticales pour des activités α -amylasiques élevées ainsi qu'un bon taux d'extraction de l'amidon sont deux facteurs favorables à une telle utilisation. Mais, il faut bien considérer qu'une activité α -amylasique élevée peut être liée, dans certains cas, à une très forte sensibilité à la germination sur

pied, ce qui constitue un sérieux handicap en zone climatique fraîche et humide. « L'indice de chute d'Hagberg » qui mesure l'activité α -amylasique de la pâte d'un nombre limité de variétés de triticales est d'un niveau à peu près correct, mais en général toujours très en-dessous de la moyenne de celui des variétés de blé tendre. Par ailleurs, le poids spécifique du grain est passé en 20 ans de 60 à 76, niveau actuel de celui des variétés de blé tendre d'hiver.

Résistances aux maladies. Le triticales, comme l'ensemble des céréales, est susceptible d'être attaqué par des *Fusarium* spp. sécrétant des mycotoxines toxiques pour l'homme et l'animal (cf. fiche p. 155). Une directive européenne, applicable à partir du 1er juillet 2006, limite à 1 250 mg par tonne la quantité de déoxynivalénol (DON) dans les grains commercialisés. Il existe des différences significatives de variabilité chez le triticales pour la résistance à la fusariose. La variabilité pour ce caractère est comparable à celle que l'on trouve chez le blé tendre.

Depuis quelques années, l'oïdium (dû à *Blumeria graminis*, anciennement *Erysiphe graminis*) et les rouilles jaune et brune (jaune due à *Puccinia striiformis*, brune due à *P. tritricina*) prennent de l'ampleur sur triticales.

Inscription et protection des variétés en France

1983, ouverture, par arrêté ministériel, d'une liste triticales.

En 2003, 52 variétés de triticales étaient inscrites sur la liste A du catalogue officiel français et 195 au catalogue européen qui est la somme des différents catalogues nationaux des états de l'Union européenne. Dans les épreuves DHS réalisées par le GEVES, 26 caractères morphologiques et physiologiques sont utilisés pour caractériser et distinguer les variétés suivant les principes directeurs de l'UPOV. La durée minimale d'examen est de 2 années. À l'issue de ces 2 ans, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des semences. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obtenteur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété. Délivré par le CPOV, il a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être commercialisée, la variété doit également répondre aux critères requis de valeur agronomique et technologique (VAT). Ainsi, la variété est testée pendant 2 ans dans un réseau national d'essais agronomiques ainsi que dans des essais spécifiques pour apprécier sa productivité, sa valeur d'utilisation et ses facteurs de régularité du rendement (résistance aux maladies et accidents climatiques) en fonction de témoins de référence. Pour le rendement, le témoin de référence est constitué par les 3 variétés les plus multipliées. Les témoins sont actualisés chaque année. Une fois proposée à l'inscription, les résultats sont publiés à destination des futurs utilisateurs.

Pour en savoir plus

- Bernard M.**, 1992. Le triticales. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 39-54.
- Bernard M., Jestin L., Bernard S., Gay G. et Bonhomme H.**, 1992. Le triticales en France : historique, évolution et perspectives. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 78 (4), 23-26.
- Bernard M. et Saigne B.**, 1977. Étude cytogénétique de F_1 et F_2 (triticales hexaploïde $\times$ seigle) : mise en évidence d'une inhibition du système diploïdisant du blé tendre. *Ann. Amélior. Plant.*, 27 (6), 737-748.
- Bernard M., Bernard S. et Saigne B.**, 1985. Tetraploid triticales : investigations on their genome and chromosome constitution. *Genetics and breeding of Triticales*, Proceedings of the 3rd Triticales Eucarpia Meeting, Clermont-Ferrand, 2-5 July 1984, S. Bernard et M. Bernard, éd., INRA Éditions, Paris, 277-287.
- Bernard S.**, 1980. In vitro androgenesis in hexaploid Triticales : Determination of physical conditions increasing embryoid and green plant production. *Plant Breed.*, 85, 308-321.
- Bernard S. et Bernard M.**, 1987. Creating new forms of 4x, 6x and 8x primary triticales association both complete R and D genomes. *Theor. Appl. Genet.*, 74, 55-59.
- Cauderon Y.**, 1981. Évolution des voies d'études des relations entre espèces. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 12, 1001-1012.
- Cauderon Y.**, 1981. Origine et évolution des triticales. *Ind. Céréales*, 10, 3-9.
- Cauderon Y. et Bernard M.**, 1980. Yield improvement from (8x $\times$ 6x) crosses, and genetic and cytoplasmic diversification in Triticales. Triticales breeding problems. *Proc. of the second Eucarpia Meeting of the Cereal Section on Triticales*, Varsovie, 1979, 329-338.
- Cauderon Y. et Cauderon A.**, 1993. Le triticales : première céréale créée par l'homme. *Natures-Sciences-Sociétés*, 1, 2, 102-107.
- Cauderon Y., Cauderon A., Gay G. et Roussel J.**, 1985. Alloplasmic lines and nucleocytoplasmic interactions in triticales. Dans : *Genetics and breeding of Triticales*. Proceedings of the 3rd Triticales Eucarpia Meeting, Clermont-Ferrand, 2-5 July 1984, INRA, Paris, 177-191.
- Cauderon Y. et Saigne B.**, 1961. Obtention d'amphidiploïdes à partir de F_1 (*Triticum aestivum* $\times$ *Secale cereale*). *Ann. Amélior. Plant.*, 11 (3), 369-373.
- Guedes-Pinto H., Lima-Brito J., Ribeiro-Carvalho C. et Gustafson J.P.**, 2001. Genetic control of crossability of triticales with rye. *Plant Breed.*, 120 (1), 27-31.
- Lafferty J. et Lelley T.**, 2001. Introduction of high molecular weight glutenin subunits 5+10 for the improvement of the bread-making quality of hexaploid triticales. *Plant Breed.*, 120 (1), 33-37.
- Larter E.N.**, 1995. Triticales. Dans : *Harvest of gold : the history of field crop breeding in Canada*, A.E. Slinkard et D.R. Knott. University Extension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, 122-129.
- Rafai P., Bata A., Jakab L. et Vanyi A.**, 2000. Evaluation of mycotoxin-contaminated cereals for their use in animal feeds in Hungary. *Food Addit. Contam.*, 17 (9), 799-808.
- Ragt**, 2000. *Le mémento du triticales, céréale de l'éleveur*. Document RAGT, Rodez, 59 p.
- Rashid V. et Rashid A.**, 2001. Comparative study of somatic embryogenesis from immature and mature embryos and organogenesis from leaf-base of Triticales. *Plant Cell, Tissue and Organ Cult.*, 64 (1), 33-38.
- Stefanowska G. et Cauderon Y.**, 1983. L'aptitude au croisement avec le seigle (*Secale cereale* L.) d'une lignée hexaploïde de *Triticum* (cv. Roazon) résultant d'hybridation interspécifique (*Graminae* Juss.). *Agronomie*, 3 (4), 355-358.
- Tiers N.**, 2002. Triticales et avoine, des petits marchés qui montent. *Cultivar* (mensuel), 536, 41.
- Zimny J., Becker D., Brettschneider R. et Lorz H.**, 1995. Fertile, transgenic triticales ($\times$ *Triticosecale* Wittmack). *Mol. Breed.*, 1 (2), 155-164.

La tulipe

Tulipa spp. (majoritairement $2n = 2x = 24$)
(Liliacées)

Présentation du genre

Le genre *Tulipa* L., dont la classification a été récemment revue, est subdivisé en deux sous-genres, *Tulipa* et *Eriostemon*, comprenant, respectivement, une trentaine et une vingtaine d'espèces.

La diversification de la tulipe s'est effectuée en Asie à partir des régions de Tien-Shan et de Pamir-Altaï dans trois directions : vers le nord et le nord-est (Sibérie, Mongolie et Chine), vers le sud (Cachemire et Inde) et vers l'ouest (Afghanistan, Iran, Caucase et Turquie). La sélection et la culture de la tulipe sont très anciennes en Turquie et en Perse. La tulipe a été introduite en Europe de l'Ouest autour de 1557 par Ogier Ghiselin de Busbecq qui était ambassadeur à la cour de Soliman le Magnifique. L'ensemble des tulipes introduites à cette époque ont été regroupées dans la même espèce *Tulipa gesneriana* L. qui constitue plus un complexe d'espèces qu'une espèce à proprement parler et qui doit sa dénomination à la première description d'une tulipe cultivée en Europe occidentale (Autriche) par le botaniste suisse Conrad Gesner, en 1561. Le succès de la tulipe en Europe occidentale a été rapide. Une véritable « tulipomanie » s'est abattue aux Pays-Bas et en France au début du XVII^e siècle. En France, un seul bulbe a été échangé dans un cas contre une brasserie et dans un autre contre un moulin ! Les descriptions réalisées au début du XVII^e siècle témoignent de la grande diversité (couleur et forme de fleur, précocité, etc.) des tulipes introduites au XVI^e siècle. Cette diversité, qui s'est encore élargie (mutation, hybridations intra- et interspécifiques) a d'ailleurs conduit à différencier 11 groupes ou types variétaux dans « l'espèce » *T. gesneriana*.

Les bulbes de tulipe sont comestibles après cuisson et les Néerlandais en consommèrent pour remplacer les tubercules de pomme de terre devenus rares durant la seconde guerre mondiale.

La tulipe est une espèce allogame préférentielle, à multiplication végétative par bulbe, cet organe assurant la pérennité de l'espèce. La variabilité de la tulipe est

très importante et elle est encore largement sous-exploitée en création variétale, même si le nombre de variétés disponibles est déjà élevé.

T. gesneriana exprime déjà une grande diversité. Mais, une diversité additionnelle a été introduite par des croisements interspécifiques.

Il existe une collection à l'INRA de Ploudaniel (Finistère Nord) et une autre est située à l'*Hortus bulborum*, à Limmen (Pays-Bas).

Production et utilisation

Il est possible de distinguer trois utilisations différentes des bulbes de gros calibre :
– pour la plante fleurie en pots. Il s'agit, en majorité, de variétés hâtives à tige courte et à fleur simple ou double ;

– pour la plantation en massifs pour la décoration des jardins (de particuliers ou d'une collectivité). Cette destination permet l'utilisation de toute la diversité variétale ;

– pour la fleur coupée. Il s'agit de variétés à longue tige.

Les bulbes de moyen ou de petit calibre constituent les plants nécessaires à la production de bulbes commerciaux (cultures de grossissement et multiplication).

La production de fleurs coupées, comme celle de plantes fleuries en pots, est généralement réalisée par des horticulteurs professionnels, très souvent à contre saison et dans des abris plus ou moins chauffés (forçage). Dans les jardins, la tulipe fut très longtemps admirée individuellement, son utilisation en parterre se développant surtout à partir du début du XIX^e siècle en Europe de l'Ouest.

La tulipe représente la 3^e espèce la plus importante en valeur pour le marché des fleurs coupées en Europe : 86 % des surfaces mondiales de production de bulbes de tulipe sont regroupées aux Pays-Bas. Ce pays domine la création variétale, la production et la distribution des bulbes au niveau mondial.

Aux Pays-Bas, au cours de la saison 2004-2005, 1 737 variétés faisaient l'objet d'une production commerciale de bulbes occupant 10 800 hectares au total. En France, les surfaces consacrées à la production de bulbes de tulipe sont beaucoup plus restreintes (293 ha en 2001 selon les données du recensement de l'horticulture, *Agreste*, n° 124, avril 2003) et sont fortement influencées par les besoins des horticulteurs néerlandais qui sont les principaux utilisateurs des bulbes produits en France, la réalisation de cultures sous contrat étant d'ailleurs une situation assez courante.

Histoire des variétés cultivées

L'horticulture ornementale est un domaine où l'innovation variétale est constamment recherchée et la tulipe n'échappe pas à cette règle, même si le renouvellement variétal est freiné par les caractéristiques biologiques de l'espèce.

Il est donc risqué de fournir une photographie d'une situation appelée à changer assez rapidement. On se contentera donc de fournir quelques informations sur des variétés qui ont joué, ou jouent encore, un rôle dans l'évolution variétale, évolution qui a été permanente depuis l'introduction de la tulipe en Europe occidentale à la fin du XVI^e siècle. Les dates indiquées ci-après correspondent, soit à la date d'une première référence à la variété, soit à l'année de son inscription dans les registres professionnels, et non pas à la date de sa création.

1845, '**Couleur Cardinal**' (obtenteur inconnu), variété du groupe Triomphe, à fleur simple de forme classique et dont l'extérieur est de couleur prune et l'intérieur de couleur écarlate. Cette variété, qui occupe encore environ 20 ha aux Pays-Bas, a produit par mutation spontanée :

– '**Rococo**' (1942, H. Slegtkamp & Co, Pays-Bas), variété du groupe Perroquet, à fleur de couleur carmin bordé rouge feu ;

– '**Prinses Irene**' (1949, Van Reisen and Sons, Pays-Bas), variété du groupe Triomphe, à fleur de couleur unique composée d'orange et de pourpre ;

– '**Arma**' (1962, Knijn Bros, Pays-Bas), variété du groupe Fleur frangée, à fleur de couleur rouge cardinal et dont le bord des pétales est frangé.

Ces trois variétés intéressantes par leurs couleurs et /ou par la forme de leur fleur possèdent aussi une bonne aptitude au forçage (production de fleurs coupées). Elles figurent, respectivement, au 15^e, 6^e et 67^e rang des variétés les plus cultivées aux Pays-Bas pendant la saison 2004-2005.

1860, '**Murillo**' (Leembruggen, Pays-Bas), variété du groupe Double Hâtive, à fleur double, de couleur blanche avec éclats de rose et parfumé. Cette variété a donné, par mutation spontanée, de façon directe ou indirecte, environ 140 variétés dont plusieurs sont encore cultivées sur des surfaces non négligeables car elles restent populaires pour une utilisation en jardins, principalement.

1931, '**Madame Lefebber**' ou '**Red Emperor**' (Van Tubergen, Pays-Bas), variété du groupe *T. fosteriana* W. Irving, à fleur simple et de couleur rouge feu. C'est une des premières et des plus spectaculaires obtentions de ce groupe, très populaire pour un usage en jardin pendant de nombreuses années.

1931, '**Fringed Beauty**' (mutation spontanée de '**Titian**', obtenteur inconnu), variété du groupe Fleur frangée, à fleur simple de couleur vermillon dont le sommet des pétales est frangé jaune. Elle a constitué le point de départ d'un groupe qui s'est ensuite beaucoup développé.

1942, '**Aladdin**' (De Mol et A.H. Nieuwenhuis, Pays-Bas), variété du groupe Fleur de Lis, à fleur simple, aux pétales aux pointes fines et récurvées (les pétales sont courbés de l'intérieur vers l'extérieur), de couleur écarlate à bord jaune et présentant une tige rigide. Cette variété a permis le développement de l'utilisation en forçage du type Fleur de Lis.

1947, '**Artist**' (Captein Bros, Pays-Bas), variété du groupe *viridiflora*, à fleur simple de couleur pourpre et saumon rose à l'extérieur et saumon rose et vert à l'intérieur. Le caractère *viridiflora* est connu depuis le XVII^e siècle, mais cette

création a, sans doute, relancé l'intérêt pour ce groupe dont l'esthétique, un peu particulière, attire des amateurs.

1951, '**Apeldoorn**' (D.W. Lefeber & Co, Pays-Bas), variété du groupe Darwin Hybride (résultat de croisements entre des variétés de *T. gesneriana* et de *T. fosteriana*), à fleur de couleur rouge cerise avec une bordure rouge fanal. Son esthétique, sa vigueur et son aptitude au forçage ont rapidement rendu cette variété très populaire (la plus cultivée pendant plusieurs années), mais la mauvaise tenue en vase de sa fleur explique le déclin continu des surfaces cultivées depuis quelques années, bien qu'elle soit toujours utilisée dans les jardins. Par mutation spontanée, elle a produit plus d'une quinzaine de variétés dont '**Golden Apeldoorn**' (1960) qui est une des variétés à fleur jaune les plus cultivées.

1953, '**Red Riding Hood**' ou '**Petit Chaperon Rouge**' (Hybrida, Pays-Bas), variété du groupe *T. greigii* Regel, à fleur simple, de couleur carmin à l'extérieur et écarlate à l'intérieur. Son feuillage marbré marron pourpre est d'une esthétique très agréable. Cette variété a contribué au développement de l'utilisation de tulipes à feuillage marbré (groupes *T. greigii* et *T. kaufmanniana* Regel) dans les jardins.

1955, '**Monte Carlo**' (Anton Nijssen & Sons, Pays-Bas), variété du groupe Double Hâtive, à fleur double, parfumée et de couleur jaune soufre. Sa bonne aptitude au forçage a fortement contribué à son développement : c'est la 4^e variété la plus cultivée aux Pays-Bas en 2004-2005. Elle a produit plusieurs mutants dont :

- '**Abba**' (1978, Bakker Bros, Pays-Bas), variété du groupe Double Hâtive, dont la fleur est de couleur rouge tomate brillant flammé rouge cardinal ;
- '**Viking**' (1984, J.W. Reus, Pays-Bas), variété du groupe Double Hâtive, à fleur de couleur flammé écarlate avec un peu de vert à l'extérieur et rouge fanal avec la base jaune canari à l'intérieur.

Ces deux variétés occupent, respectivement, le 7^e et 10^e rang des variétés les plus cultivées aux Pays-Bas pour la saison 2004-2005.

1959, '**Angélique**' (mutation de '**Granda**', D.W. Lefeber & Co, Pays-Bas), variété du groupe Double Tardive, à fleur double de couleur rose pâle avec une teinte plus claire et plus sombre, légèrement parfumée et pluriflore (c'est-à-dire, dont la hampe florale est ramifiée). Son esthétique nouvelle et très attrayante ainsi que son aptitude au forçage ont favorisé son développement, mais sa sensibilité à la fusariose provoque un déclin de sa popularité.

1961, '**Yokohama**' (J.F. Van den Berg & Sons, Pays-Bas), variété du groupe Triomphe, à fleur simple légèrement pointue et de couleur jaune indien. La qualité de sa fleur et son aptitude au forçage font de cette variété la 3^e la plus cultivée aux Pays-Bas pour la saison 2004-2005.

1968, '**Leen van der Mark**' (Konijnenburg & Mark, Pays-Bas), variété du groupe Triomphe, à fleur simple et de couleur rouge cardinal bordé blanc au sommet des pétales. Une bonne aptitude au forçage et une bonne vigueur ont favorisé le développement de cette variété, la plus cultivée aux Pays-Bas pour la saison 2004-2005.

1968, '**Ille De France**' (Blom & Padding, Pays-Bas), variété du groupe Triomphe, à fleur simple et de couleur rouge cardinal à l'extérieur et rouge sang à l'intérieur. Les caractéristiques agronomiques (facilité de production de bulbes), la rigidité de la tige et la qualité de la fleur font que cette variété est la plus cultivée parmi les variétés de tulipe du type « rouge classique » pour la saison 2004-2005 aux Pays-Bas. Elle est particulièrement bien adaptée aux conditions de forçage de ce pays.

1975, '**Amethyst**' (IVT, Boots, Pays-Bas), variété du groupe Perroquet, à fleur aux pétales déformés (typique du groupe Perroquet) et de couleur pourpre de fuchsine flammé pourpre royal. Bien que le caractère « Perroquet » soit connu depuis le XVII^e siècle, cette variété a la particularité d'être la première à le transmettre par la voie sexuée. Elle a permis l'élargissement du groupe par hybridation, et non seulement par mutation comme c'était le cas auparavant.

Aucune variété de Rembrandt, 11^e et dernier groupe, ne fait actuellement l'objet d'une production commerciale.

Remarque. La diversité effectivement cultivée est très faible : 50 % de la surface totale de production de bulbes des Pays-Bas est actuellement occupée par une quarantaine de variétés seulement et 22 % sont commercialisées depuis plus de 50 ans. La prépondérance du caractère « aptitude au forçage » (pour la production de fleur coupée) qui rend inutile la sélection pour la vigueur ou l'étalement de la période de floraison par exemple, a conduit à une réduction de la diversité pour ces caractères dans les variétés récentes. La gamme variétale utilisée dans les jardins est beaucoup plus large que celle utilisée pour la production de fleur coupée. La gamme variétale cultivée en France est influencée par les besoins des horticulteurs néerlandais et aussi par le fait que toutes les variétés actuellement cultivées en France sont des obtentions néerlandaises. Les producteurs français sont dans l'obligation de s'approvisionner aux Pays-Bas pour acquérir les plants nécessaires à l'installation de cultures et/ou pour renouveler leur gamme variétale. La gamme cultivée en France est beaucoup plus restreinte que celle que l'on peut trouver aux Pays-Bas, mais inclut une bonne partie des variétés les plus cultivées dans ce pays.

Regard sur 50 ans de sélection

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'amélioration de la tulipe n'était pas une exclusivité néerlandaise car elle était également active en France et en Grande-Bretagne.

Depuis, la recherche sur cette plante est essentiellement réalisée aux Pays-Bas. L'amélioration variétale est particulièrement longue chez cette espèce qui nécessite six années pour réaliser son cycle graine à graine. Par ailleurs, la diffusion des nouvelles variétés est lente puisqu'il faut environ 25 années de multiplication pour constituer un stock de bulbes suffisant pour commencer la commercialisation d'une nouvelle variété en raison du taux de multiplication faible. Ces deux difficultés et le coût qui en découle, découragent de nombreux sélectionneurs.

Caractères importants améliorés

Diversification des couleurs et forme de la fleur

Couleur de la fleur. Des tulipes de toutes les couleurs, exceptées le vrai bleu et le noir pur, ont pu être obtenues. La fleur peut être panachée (*cf.* encadré ci-dessous), tachetée et même avoir des couleurs qui varient au cours du temps.

Forme des pétales. La fleur peut être carrée ou longue, simple ou double. Les pétales peuvent être récurvés, pointus, frangés, découpés, etc.

Aptitude au forçage. Avant que le forçage soit une technique répandue, la programmation de la production de fleur coupée de tulipe reposait sur l'utilisation de nombreuses variétés de précocité et de vigueur différentes. L'introduction de l'aptitude au forçage associée à l'amélioration des technologies (serres performantes et amélioration des conditions de conservation des bulbes) ont été déterminantes pour permettre une production de fleur coupée tout au long de l'année.

Longévité en vase. Elle est maintenant généralement comprise entre 4 et 11 jours, à 20 °C. Les variétés appartenant aux groupes *T. fosteriana*, *T. greigii*, *T. kaufmanniana* et *T. eichleri* Regel manifestent une très mauvaise tenue en vase. 'Apeldoorn' (hybride de *T. gesneriana* × *T. fosteriana*), par exemple, a une tenue en vase restreinte à 5-6 jours.

Longueur de la tige. Des variétés très diverses ont été sélectionnées pour ce caractère.

Association de la précocité et de la vigueur. Des variétés présentant ces deux qualités ont été obtenues par le choix de géniteurs adaptés au sein de l'espèce *T. gesneriana*.

Tous ces caractères ont été pris en compte dans le programme d'amélioration mis en place à l'INRA, à partir de 1965. Ce programme, arrêté en 2000, a débouché sur l'obtention de nombreux clones dont le développement commercial est actuellement en cours, essentiellement au sein d'entreprises néerlandaises. Plus d'une trentaine de clones ont déjà reçu une dénomination commerciale, le premier commercialisé ('Pieter de Leur', issu d'un semis de 1972) étant actuellement cultivé sur environ 5 ha aux Pays-Bas.

Les fleurs panachées

Lors de l'introduction de la tulipe en Europe occidentale à la fin du ^{xvi}^e siècle, les variétés les plus recherchées étaient celles qui produisaient des fleurs panachées. Très tôt, il avait été remarqué que la fleur panachée provenait d'une fleur uniformément colorée et qu'elle périssait rapidement. Bien plus tard, il a été montré que ce caractère attractif était le fait d'une contamination virale du bulbe.

À côté de ce type de panachure d'origine virale, il faut signaler l'existence de panachures d'origine génétique. Actuellement, le caractère « fleur panachée » des variétés proposées dans le commerce est essentiellement d'origine génétique, les plantes virosées étant généralement éliminées en culture au stade de la production de bulbes.

Méthodes utilisées

MÉTHODE D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Il existe un grand nombre de caractères à déterminisme génétique simple qui sont à la base de la diversité présente dans cette espèce, comme certains caractères de la fleur (couleur, forme, pétales aux bords frangés) et le caractère pluriflore (ramification de la hampe florale). Certaines variétés sont connues pour avoir un taux de mutation spontanée très élevé ('Murillo').
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI à l'étranger Plusieurs variétés ont été obtenues aux Pays-Bas par mutagenèse. Ces variétés ont été diffusées ('Rijnveld' -1949, 'Estrella' – 1954, 'Dominique', 'Faraday', 'Ivette', 'Orange Charles', 'Rimo', 'Santina' et 'Yvonne' – 1985).
Croisements interspécifiques	OUI La grande majorité des variétés modernes appartiennent à l'espèce <i>T. gesneriana</i>, mais il existe néanmoins un certain nombre de variétés issues de croisements interspécifiques. L'hybridation entre <i>T. gesneriana</i> et <i>T. fosteriana</i> a donné le groupe Darwin Hybride ('Apeldoorn'). Des variétés appartenant aux groupes <i>T. kaufmanniana</i>, <i>T. greigii</i> et <i>T. fosteriana</i> sont en fait des hybrides interspécifiques, obtenus par croisements entre ces espèces ou avec <i>T. gesneriana</i>. Le sauvetage d'embryons <i>in vitro</i> permettrait d'améliorer légèrement le taux de réussite de ces hybridations.
Hybridation somatique	AUCUNE
Élévation du niveau de ploïdie	OUI Il existe des variétés tétraploïdes. Il existe des variétés triploïdes, notamment parmi le groupe Darwin Hybride.
Transgénèse	AUCUNE Jusqu'à présent, toutes les tentatives semblent avoir échoué, l'absence de maîtrise de la régénération <i>in vitro</i> constituant un facteur limitant.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE	
Multiplication végétative	OUI Toutes les variétés sont des clones multipliés végétativement. Le taux de multiplication est très faible (2 à 3 par an), ce qui représente un frein important à la création variétale chez cette espèce. Il faut 25 ans pour pouvoir multiplier suffisamment une variété en vue de sa diffusion. ESSAIS Les résultats actuellement disponibles ne permettent pas d'envisager l'utilisation de la culture <i>in vitro</i> comme technique de multiplication accélérée en routine.

suite...

... suite

Sélection sanitaire	OUI Des épurations visuelles sont pratiquées pour éliminer des plantes malades au champ. Des tests ELISA et des tests moléculaires sont disponibles pour détecter certains virus.
Haploïdisation	ESSAIS Des essais d'haploïdisation (cultures de microspores isolées <i>in vitro</i>) se sont révélés peu concluants jusqu'à présent.
Recours à la stérilité mâle	OUI Le pollen est non fonctionnel chez de nombreuses variétés triploïdes.
Recours à l'auto-incompatibilité	OUI Il existe divers types d'incompatibilité (absence de germination du pollen, arrêt de croissance du tube pollinique, etc.) dont le déterminisme génétique est encore mal connu.
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs enzymatiques peuvent être utilisés pour l'identification de variétés.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Des croisements intra- ou interspécifiques sont réalisés et une sélection est appliquée dans la descendance de ces croisements. Les clones les plus prometteurs sont multipliés végétativement de manière à réaliser une variété clonale. La création variétale de la tulipe est très longue, car il faut attendre 5 à 6 années de culture à partir du semis pour obtenir une première floraison, et ensuite le coefficient naturel de multiplication se situe entre 2 et 3.
Types variétaux	Variété clone. Toutes les variétés de tulipe sont des clones issus d'hybridations ou de mutations.

Perspectives d'amélioration

La variabilité au sein de *T. gesneriana* est encore sous-utilisée et son exploitation devrait permettre de créer de nouvelles variétés pendant encore de nombreuses années. De plus, des croisements avec d'autres espèces du genre pourraient être réalisés.

Caractères à améliorer

Aspect du feuillage. Des couleurs et des motifs différents peuvent être obtenus par croisements interspécifiques avec *T. fosteriana*, *T. greigii* et *T. kaufmanniana*.
Résistances aux maladies. L'existence de résistances au virus de la panachure de la tulipe (*Tulip breaking virus*, TBV), au *Fusarium oxysporum* f. sp. *tulipae* et au *Botrytis tulipae* est essentielle pour garantir une production sans traitement chimique.

Résistance au virus de la panachure de la tulipe. Elle pourrait être apportée par croisements interspécifiques avec *T. fosteriana* ou *T. praestans* Hoog.

Résistance à la fusariose. Elle est déjà partielle chez certaines variétés de *T. gesneriana* et pourrait être améliorée par croisements avec *T. eichleri*, *T. fosteriana* ou *T. kaufmanniana*.

Techniques à développer

Le principal défi technique à relever reste la maîtrise de la régénération de bourgeons *in vitro* et leur évolution en bulbes.

Protection des variétés et inscription sur un registre professionnel

Il n'existe pas de catalogue officiel pour l'inscription des variétés d'espèces ornementales. Les examens techniques pour la délivrance de COV sont conduits aux Pays-Bas pour l'ensemble des états de l'Union Européenne. Dans le cas particulier de la tulipe, les variétés sont « naturellement protégées » d'une exploitation commerciale illicite par une durée de multiplication très longue (25 ans) pour obtenir un stock commercial suffisant.

Il faut noter que, depuis 1955, l'Association royale des producteurs de bulbes des Pays-Bas (*Koninklijke Algemeene Vereniging Voor Bloembollencultuur*, KAVB) est reconnue comme l'instance internationale chargée de l'enregistrement des nouvelles variétés pour *Tulipa* et autres plantes bulbeuses (sauf pour *Dahlia* Cav., *Narcissus* L., *Lilium* L. et *Gladiolus* L. à grande fleur). Cette instance a donc mis en place un jardin d'essais où le critère de distinction des variétés peut être vérifié. Elle contrôle également la dénomination des nouveautés et publie périodiquement une liste internationale des noms des variétés ainsi que leurs principales caractéristiques. Cet enregistrement n'est pas obligatoire, mais semble pratiqué par tous les obtenteurs néerlandais, car le registre publié par l'Association royale des producteurs de bulbes des Pays-Bas constitue une référence. Cette démarche est tout à fait indépendante de celle nécessaire à l'obtention d'un COV et ne constitue pas une protection juridique.

Pour en savoir plus

Booy G., Donkers-Venne T.H.M. et van der Schoot J., 1993. Identification of tulip varieties based on polymorphism in esterase isozymes from bulb scales. *Euphytica*, 69 (3), 167-176.

Custers J.B.M., Ennik E., Eikelboom W., Dons J.J.M. et van Lookeren-Campagne M.M., 1997. Embryogenesis from isolated microspores of tulip ; towards developing F₁ hybrid varieties. *Acta Hortic.*, 430, 259-266.

van Eijk J.P., Toxopeus S.J., Eikelboom W. et Sparnaaij L.D., 1983. Early selection for forcing ability in tulip (*Tulipa* L.) breeding. *Euphytica*, 32 (1), 75-83.

van Eijk J.P. et Eikelboom W., 1980. Methods of selection in tulip breeding. *Acta Hortic.*, 109, 217-225.

- Eikelboom W., van Eijk J.P., Peters D. et van Tuyl J.M.**, 1992. Resistance to tulip breaking virus (TBV) in tulip. *Acta Hortic.*, 2 (325), 631-636.
- Le Nard M.**, 1977. L'amélioration de la tulipe pour l'aptitude au forçage. Recherche de critères de sélection. *Ann. Amélior. Plant.*, 27 (4), 451-463.
- Le Nard M.**, 1992. La tulipe. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A. Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 527-533.
- Le Nard M.**, 1999. Tulipe : une diversité encore sous utilisée. *PHM Rev. Hortic.*, 406, 60-66.
- Le Nard M.**, 2001. Tulipe : biodiversité et sélection. Dans : *Agriculture et biodiversité des plantes*, (S. Le Perchec, P. Guy, A. Fraval). *Dossiers de l'Environnement de l'INRA*, 21, 105-111.
- van Raamsdonk L.W.D. et de Vries T.**, 1996. Variety classification in *Tulipa* L. (*Liliaceae*). *Acta Bot. Neerl.*, 425, 183-198.
- van Raamsdonk L.W.D., Eikelboom W., de Vries T. et Straathof T.P.**, 1997. The systematics of the genus *Tulipa* L. *Acta Hortic.*, 430, 821-828.
- van Scheepen J.**, 1996. Classified List and International Register of Tulip Names. Royal General Bulbgrowers Association (KAVB), Hillegom, Pays-Bas.

La vigne et ses porte-greffe

Vitis vinifera L. et *Vitis* L. spp. ($2n = 2x = 38$)
(Ampélidacées ou Vitacées)

Présentation du genre

Une série d'évolutions, comprenant entre autres, l'apparition par mutation de fleurs hermaphrodites à partir de fleurs mâles ou de fleurs femelles, est probablement responsable de la transformation de l'espèce sauvage *Vitis vinifera* L. subsp. *sylvestris* (Gmel.) Beger in Hegi en vigne cultivée *Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera* à partir du 7^e millénaire avant l'ère chrétienne.

La vigne a été domestiquée par les peuples de l'Asie occidentale et sa culture s'est répandue dans le pourtour de la mer Méditerranée. Les Grecs ont été les premiers viticulteurs européens. Ils ont transmis leur connaissance de la vinification aux Romains qui l'ont, à leur tour, diffusée dans tous les pays qu'ils ont conquis. En France, le premier vignoble fut implanté à Massilia (Marseille, Bouches-du-Rhône) par les Phocéens environ 600 ans av. J.-C. Les grands vignobles de Bordeaux, Bourgogne, Alsace et Champagne ont été respectivement implantés aux I^{er}, II^e, III^e et IV^e siècles. Le christianisme a contribué à propager la culture de la vigne et l'usage du vin avec le développement et la renommée de la viticulture ecclésiastique jusqu'à la fin du Moyen Âge. Le vin européen a conquis l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud à partir du XV^e siècle, puis la vigne a été implantée en Afrique du Sud, Australie, Nouvelle-Zélande, etc.

La viticulture a été marquée par toute une série d'épidémies dont la plus grave a été celle occasionnée par un insecte, le phylloxéra qui, dans le dernier quart du XIX^e siècle, a presque entièrement anéanti le vignoble français (cf. encadré p. 760 et 761).

Il a fallu attendre les travaux de L. Pasteur, en 1865, pour que la vinification soit expliquée scientifiquement.

Le phylloxéra

Introduction en France. Alors que la viticulture française était dans une phase de prospérité, une première alerte eut lieu en 1847 avec l'oïdium, maladie fongique causée par *Uncinula necator*, importée des États-Unis. Elle a causé de terribles dégâts au vignoble français au début des années 1850 et a provoqué une baisse considérable de la production : celle-ci est passée de 39 millions d'hectolitres en 1851 à 11 millions d'hectolitres en 1854. Des traitements à base de soufre s'avérèrent très efficaces et leur généralisation permit de juguler cette attaque.

Par ailleurs, depuis la fin du XVIII^e siècle, certaines vignes nord-américaines avaient été introduites dans de nombreuses régions de France par des botanistes et des pépiniéristes. Ces vignes se montrèrent résistantes à l'oïdium, ce qui suscita un regain d'intérêt et de nouvelles importations en provenance des États-Unis eurent lieu vers 1860, sans aucune précaution sanitaire. Les vignes nord-américaines prospérèrent ainsi dans de nombreuses collections d'étude dans diverses zones du vignoble français, mais sans connaître de développement cultural en raison du goût foxé du vin qui déplaisait au consommateur français.

Épidémie et découverte de l'agent pathogène. En France, un étrange dépérissement des vignes fut signalé, d'abord dans le Gard, à partir de 1861. Il s'étendit très rapidement, d'abord en Provence, puis dans le Sud-Ouest, dévastant ainsi progressivement les vignobles de façon inexorable. Le phylloxéra (*Dactylosphaera vitifolii* ou *Phylloxera vastatrix*), agent responsable de ce dépérissement de la vigne fut identifié vers 1868. C'est un puceron qui pique la racine, occasionnant des tubérosités sur celle-ci ainsi que des nodosités sur la radicle. La racine finit par se décomposer, ce qui entraîne la mort du plant infecté. Cette découverte a été difficile, notamment en raison du cycle très complexe du phylloxéra qui le conduit à adopter 4 formes différentes : gallicole (responsable de la formation de galles sur la feuille), radicole (responsable des attaques sur racine), ailée et sexuée.

Conséquences de l'épidémie phylloxérique. Cette maladie a eu de très nombreuses répercussions techniques, économiques et sociologiques. Ce fut une catastrophe nationale. Le vignoble français a régressé de 28 % entre 1875 et 1903, perdant ainsi 660 000 ha et la production nationale est devenue inférieure à la consommation. Pour pallier la pénurie de vin, on vit se développer la fabrication frauduleuse de vin artificiel obtenu notamment par la fermentation de fruit ou de raisin sec et une coloration en rouge. Cette maladie a également entraîné la perte d'une partie des marchés d'exportation, un bouleversement avec l'abandon des terres, une désertification des campagnes viticoles avec le licenciement des métayers, commis et façonniers. Des familles ont même été contraintes de s'expatrier et ont créé des vignobles sur d'autres continents. Ultérieurement, lors de la reconstitution du vignoble, il en est résulté une transformation des structures agricoles accompagnée d'un déplacement des vignobles des coteaux vers les plaines dans les régions méridionales et souvent de leur disparition dans les régions plus septentrionales. Cette épidémie a eu aussi pour conséquences la disparition définitive de nombreux cépages anciens et la modification de l'encépagement de certains vignobles.

Moyens de lutte. Pour enrayer l'épidémie, plusieurs stratégies de lutte, telles que des traitements au sulfure de carbone ou des submersions totales des sols pendant au moins 40 jours, ont été tentées sans beaucoup de succès : les traitements au sulfure de carbone se sont avérés coûteux et toxiques et l'immersion n'a pu être pratiquée que dans des zones très limitées.

Dès 1874, il a été montré que les espèces américaines *V. rupestris* Scheele et *V. riparia* Michx. étaient résistantes au phylloxéra. Très rapidement, des greffons prélevés sur les vignes survivantes ont été greffés sur ces deux espèces. L'application de cette stratégie fut une étape importante dans la lutte contre le phylloxéra. Des porte-greffe de *V. rupestris* ont été couramment utilisés jusqu'aux années 1960 notamment dans les vignobles méridionaux et on trouve encore des porte-greffe de *V. riparia* de nos jours dans certaines régions françaises, notam-

ment le Médoc. Cependant, ces porte-greffe étaient mal adaptés aux sols de nombreuses régions françaises et provoquaient sur les variétés greffées des désordres physiologiques (chlorose) et une sensibilité à la pourriture grise (maladie fongique due à *Botrytis cinerea*).

Au retour de sa mission aux États-Unis en 1873, J.-E. Planchon recommanda deux possibilités d'utilisation des variétés de vigne nord-américaines : d'une part en culture directement sur leurs propres racines pour la production de vin ordinaire, et d'autre part comme porte-greffe pour les cépages français et pour sauver ainsi « une des richesses et l'on peut dire, des gloires de notre agriculture nationale ».

La première approche a consisté à utiliser d'abord des variétés nord-américaines issues de croisements interspécifiques, puis à créer de nouveaux hybrides par cette même méthode. Ce travail de création, mené par des hybrideurs français tels que G. Couderc, P. Castel, A. Millardet et leurs successeurs, a donné les « hybrides producteurs directs » (HPD). Cultivés sur leurs propres racines, résistants au mildiou (causé par *Plasmopara viticola*), à l'oïdium et au phylloxéra, ils produisaient du raisin donnant un vin de qualité médiocre. Leur résistance insuffisante au phylloxéra a souvent obligé de les greffer, mais ils constituaient encore en 1958, 30 % du vignoble français pour la production de vin ordinaire de consommation courante.

La seconde approche a été le fruit des travaux de ces mêmes hybrideurs français qui ont réalisé, à partir de 1880, des hybridations entre des espèces du genre *Vitis* judicieusement choisies (comme *V. riparia*, *V. rupestris* et *V. berlandieri* Planch.) pour créer des porte-greffe résistants au phylloxéra et adaptés aux conditions pédoclimatiques françaises (cf. encadré p. 771). La reconstitution du vignoble français à l'aide de ces porte-greffe fut une œuvre longue et laborieuse qui s'étala sur plusieurs décennies : commencée dans l'Hérault vers 1880, elle n'était pas entièrement achevée après la première guerre mondiale dans les vignobles septentrionaux.

La vigne est une plante pérenne, strictement allogame et à fécondation anémophile chez les espèces sauvages du genre *Vitis* L., mais préférentiellement autogame chez l'espèce cultivée *Vitis vinifera* L., hormis quelques variétés de raisin de table à fleurs femelles. Elle est multipliée végétativement essentiellement par bouturage et par greffage. Les populations sauvages de *Vitis vinifera*, communément appelées lambrusques, n'existent en France qu'à l'état de reliques, souvent isolées par rapport aux vignobles cultivés et ont donc bien peu de chances d'être pollinisées par des vignes cultivées. Les relations génétiques entre lambrusques et cépages cultivés font actuellement l'objet de recherches approfondies au moyen des marqueurs moléculaires.

Vitis vinifera est la seule espèce de vigne cultivée en Europe. De nombreuses espèces de vigne poussent à l'état sauvage en Amérique du Nord (*V. riparia*, *V. rupestris*, *V. berlandieri*, *V. aestivalis* Michx., etc.). L'une d'entre elles (*V. labrusca* L.) est cultivée pour ses fruits sur des surfaces importantes, en particulier dans les vignobles du nord-est des États-Unis et du Canada. Cependant, il est maintenant admis que les variétés cultivées de cette espèce sont des hybrides naturels entre des plants sauvages et des vignes européennes introduites par les premiers colons au XVII^e siècle. Il faut également mentionner le cas particulier de l'espèce *Vitis rotundifolia* Michx. (la vigne « muscadine ») classée en 1887 par J.-E. Planchon dans une section particulière (*Muscadinia*) du genre *Vitis*, mais de nombreux caractères morphologiques, anatomiques et

surtout caryologiques (nombre de chromosomes différent : $2n = 40$) font considérer *Muscadinia* comme un genre à part entière. Cette espèce, *Vitis rotundifolia* (*Muscadinia rotundifolia* (Michx.) Small), répandue à l'état sauvage dans tout le sud-est des États-Unis, est cultivée sur quelques milliers d'hectares, notamment dans les États de Géorgie et de Caroline.

En Asie, il existe également une très grande variabilité interspécifique, les deux espèces les plus connues étant *V. coignetiae* Pulliat ex Planch. et *V. amurensis* Rupr., mais aucune d'entre elles n'est passée dans la pratique culturale.

La FAO a recensé plus de 80 pays, localisés sur tous les continents, produisant du raisin. Il existe d'ailleurs plus de 5 000 variétés cultivées dans le monde. Des mesures visant à maintenir cette diversité sont prises depuis plusieurs années tant en France qu'à l'étranger. Les collections de l'INRA contiennent environ 2 700 variétés dont plus de 460 sont ou ont été cultivées en France. Ces collections nationales, dont la plus importante est celle du Domaine de Vassal à Marseillan-Plage (Hérault) qui dépend du Centre de Recherches INRA de Montpellier, ont généralement été utilisées pour l'établissement de collections régionales assurant la conservation d'un certain nombre de variétés locales. Créé en 1962, l'Établissement national technique pour l'amélioration de la viticulture (ENTAV) a actuellement la charge, avec l'INRA, de la sélection clonale en France. À ce titre, il maintient dans ses collections du Domaine de l'Espiguette au Grau du Roi (Gard) plus de 2 500 clones exempts de virus, dont plus de 1 100 ont été agréés par le CTPS. Afin de lutter contre les inconvénients de la sélection clonale et de préserver la variabilité qui existe encore au sein des vieilles vignes autrement destinées à disparaître, un programme national d'implantation de conservatoires de clones, coordonné par l'ENTAV, a été lancé en 1987. À l'heure actuelle, 76 conservatoires ont été mis en place ; ils regroupent au total plus de 14 000 clones appartenant à 60 des 207 variétés actuellement cultivables en France. Cependant, des maladies mettent en danger les collections maintenues en plein champ. Par exemple, dans la collection de l'INRA de Vassal, de nombreuses variétés sont atteintes par deux maladies d'origine virale : le court-noué GFLV (*Grapevine fanleaf virus*) et surtout l'enroulement GLRaV (*Grapevine leafroll associated virus*). De plus, le développement épidémique de la flavescence dorée (maladie à phytoplasme transmise par une cicadelle) et des maladies du bois (eutypiose, esca) fait peser une menace permanente sur la pérennité de ces collections, qui sont également exposées aux aléas climatiques. Face à cette épée de Damoclès, la réalisation de collections de variétés *in vitro* a été entreprise. Celles-ci sont très lourdes à gérer et, en attendant la mise au point d'une technique fiable de cryoconservation, ne peuvent être qu'un palliatif applicable à un nombre limité de variétés, notamment celles dont la perte serait irréparable. La plupart des vieilles variétés françaises sont ainsi maintenues dans le conservatoire *in vitro* du Domaine du Chapitre à Villeneuve-lès-Maguelone (Hérault) qui dépend, comme le Domaine de Vassal, du Centre de Recherches INRA de Montpellier.

Production et utilisation

Le produit récolté, le grain de raisin, est une baie. Les baies sont disposées en grappes. La production mondiale de raisin est de 66,6 millions de tonnes (données FAO, 2004). Les principaux pays producteurs sont l'Italie (8,7 millions de tonnes), la France (7,5 millions de tonnes), l'Espagne (7,1 millions de tonnes), la Chine (5,5 millions de tonnes) et les États-Unis (5,4 millions de tonnes).

On distingue deux types de raisin :

- le raisin de table utilisé pour la consommation en fruit frais ou sec ;
- le raisin de cuve utilisé pour l'élaboration de vin, de jus ou d'eau-de-vie.

La répartition de l'utilisation du raisin pour la fabrication de ces différents produits est très différente selon les pays. En 2004, 295 millions d'hectolitres de vin ont été produits dans le monde. Les plus gros producteurs de vin sont la France (57 millions d'hectolitres), l'Italie (51,4 millions d'hectolitres), l'Espagne (43 millions d'hectolitres) et les États-Unis (19,3 millions d'hectolitres) (estimations OIV, 2004).

Un grand nombre de données épidémiologiques montre que le vin, lorsqu'il est consommé avec modération, agit comme un protecteur du système cardio-vasculaire. Par contre, une consommation supérieure à 20 ou 30 g d'alcool pur par jour est nuisible pour la santé et entraîne une dépendance vis-à-vis du produit.

Histoire des variétés cultivées en France

Chez la vigne, une variété cultivée produisant du raisin de cuve ou du raisin de table est couramment désignée par le terme de « cépage ». L'identification des cépages ou ampélographie repose sur l'étude de caractères morphologiques comme la couleur du bourgeon ou de la baie, la forme de la feuille ou du rameau ou la dimension de la grappe. Les cépages sont donc des populations composées d'individus ayant des génotypes plus ou moins différents, mais suffisamment proches pour extérioriser des caractéristiques morphologiques et phénologiques communes. Dans le cas de variétés parfois vieilles de plusieurs siècles, des différences ont pu apparaître au cours de la multiplication végétative. Ces différences stables résultent de mutations qui ne sont pas toutes connues, ni caractérisées. Une diversité génétique existe donc au sein d'une variété ancienne, ce qui permet de faire le choix dans chaque cépage d'un nombre plus ou moins grand de génotypes intéressants qui constituent autant de clones.

Quelques cépages anciens d'origine souvent inconnue

'**Carignan**', cépage d'origine espagnole produisant un raisin noir de cuve. Il se caractérise par sa rusticité et sa capacité à donner un vin très charpenté. Introduit en France au XII^e siècle, il représente encore 30 % de l'encépagement du Languedoc-Roussillon. Il est aussi un peu cultivé en Espagne et dans le monde.

‘**Chasselas**’, cépage produisant un raisin blanc de table utilisé pour l’AOC « Chasselas de Moissac ». Cette variété est très ancienne car, dès 1530, l’abbaye de Moissac avait envoyé 30 mulets, chargés de plants de vigne de cette variété, à la résidence de François 1^{er} à Fontainebleau. En Suisse, en Allemagne et dans de nombreux pays d’Europe centrale, ‘Chasselas’ est aussi utilisé comme cépage de cuve.

‘**Gewurztraminer**’, cépage produisant un raisin rose de cuve qui s’est développé en Alsace à partir du XVI^e siècle. Il donne un vin blanc corsé et aromatique qui représente 20 % du vignoble alsacien.

‘**Grenache**’, un des cépages produisant un raisin noir de cuve les plus cultivés dans le monde. Originaire d’Espagne, il a été introduit en France au Moyen Âge et est à la base de la plupart des AOC méridionales. Il est aussi bien adapté à l’élaboration de vins de garde qu’à celle de vins doux naturels.

‘**Muscat à Petits Grains**’, cépage donnant un raisin de cuve au goût très prononcé, déjà connu des Romains et sans doute des Grecs. Il est principalement utilisé pour fabriquer des vins doux naturels.

‘**Pinot noir**’, cépage très ancien produisant un raisin noir de cuve. Il permet de fabriquer des vins d’une grande finesse et dotés d’une palette aromatique très agréable. Il est surtout cultivé en Bourgogne d’où il est probablement originaire, et en Champagne.

‘**Sultanine**’ cépage originaire du Moyen-Orient, cultivé dans le monde entier pour la production de raisin sec et de raisin de table. Les baies blanches sont apyrènes, c’est-à-dire sans pépin. La production de raisin de table nécessite des traitements hormonaux à base d’acide gibbérellique ou des pratiques viticoles délicates (incision annulaire) pour faire grossir les baies.

Cépages anciens issus de croisements

‘**Cabernet-Sauvignon**’, cépage produisant un raisin noir de cuve. Il résulte d’un croisement entre ‘Cabernet Franc’ et ‘Sauvignon’ qui aurait été réalisé au XVII^e siècle. Il représente environ 50 % de l’encépagement du Médoc et a fait la renommée des vins rouges de Bordeaux. Malgré sa grande sensibilité à l’oïdium et à l’eutypiose, le ‘Cabernet-Sauvignon’ s’adapte à de nombreuses situations et est très répandu dans le monde.

‘**Chardonnay**’, cépage produisant un raisin blanc de cuve. Il se caractérise par sa capacité à donner un vin blanc fin apte à vieillir. Il résulte d’un croisement réalisé probablement au Moyen Âge entre un plant de ‘Pinot noir’ et un plant de ‘Gouais’, cépage d’origine dalmate (‘Heunisch blanc’) donnant des vins de qualité médiocre, mais très cultivé à cette époque. Le ‘Chardonnay’ n’a vraiment été caractérisé et différencié du ‘Pinot Blanc’ que depuis la fin du XIX^e siècle. Ce cépage est très utilisé en France, notamment en Bourgogne, en Champagne et aussi dans le reste du monde.

‘**Gamay Noir**’, cépage produisant un raisin noir de cuve utilisé notamment pour élaborer les vins du Beaujolais. ‘Gamay’, comme ‘Chardonnay’ et une vingtaine d’autres cépages du nord-est de la France, est issu du croisement entre ‘Gouais’ et ‘Pinot noir’. Il est également répandu en Europe centrale.

‘**Syrah**’, cépage produisant un raisin noir de cuve. Il permet d’élaborer seul ou en assemblage des grands vins rouges aromatiques et aptes à vieillir. Contrairement à l’origine persane (Shiraz) ou italienne (Syracuse) qui lui avait été attribuée, ‘Syrah’ est issu du croisement entre deux vieux cépages dauphinois, aujourd’hui disparus : ‘Mondeuse blanche’ et ‘Durezza noire’. De plus en plus cultivé dans le vignoble méridional français, en dépit de sa sensibilité à une maladie de dépérissement dont l’origine est encore inconnue, le cépage ‘Syrah’ est également très répandu dans les vignobles du Nouveau Monde, notamment en Californie et en Australie.

Quelques variétés plus récentes

1816, ‘**Isabelle**’, variété de *V. labrusca*, espèce indigène d’Amérique du Nord. Il s’agit, en fait, d’un hybride naturel avec *V. vinifera*. ‘Isabelle’ a été introduite en Europe en 1825 comme variété ornementale pour le jardin. Elle s’est avérée très résistante à l’oïdium, mais sensible au phylloxéra. Le raisin et le vin obtenus développent un goût très foxé. Cette variété très cultivée dans le monde a été interdite en France en 1934. Mais, son croisement avec le ‘Clinton’, autre hybride interdit en 1934, avait donné naissance dans les années 1880 au ‘Vialla’, porte-greffe toujours utilisé dans les sols granitiques du Beaujolais.

1840-1850, ‘**Concord**’, variété de *V. labrusca*, issue, comme la précédente, d’une hybridation naturelle avec *V. vinifera*. Sa résistance aux parasites et aux gelées hivernales explique son développement dans les vignobles du nord-est des États-Unis et du Canada, où elle a remplacé ‘Isabelle’.

1855, ‘**Alicante-Bouschet**’ (H. Bouschet, France), une des toutes premières variétés produisant un raisin de cuve à jus coloré (teinturier). Elle est issue d’un recroisement entre ‘Grenache’ (syn. ‘Alicante’) et ‘Petit Bouschet’, lui-même issu d’un croisement initial réalisé en 1824 entre ‘Aramon’ et ‘Teinturier du Cher’. En 1927, cette variété représentait 18 % des surfaces en France, mais n’est plus actuellement cultivée que sur 10 000 ha.

1869, ‘**Noah**’, variété produisant un raisin blanc de cuve. Elle a été introduite après la crise phylloxérique pour reconstituer le vignoble de régions productrices de vin blanc. ‘Noah’ est issu de croisements interspécifiques complexes *V. labrusca* × *V. riparia* × *V. vinifera*. L’égrenage excessif, la difficulté de pressurage de sa grappe et le fait qu’il produisait un vin soupçonné de rendre fou (présence de méthanol) ont motivé l’interdiction de sa culture en France à partir de 1934 (cépages interdits). Mais, par recroisement avec ‘Folle blanche’, il a donné naissance à ‘Baco blanc’ (ou ‘Baco 22 A’), seule variété hybride dont la culture est actuellement recommandée en France, mais uniquement pour la production d’eau-de-vie (Armagnac).

1911, **'Italia'** (Pirovano, Italie) variété issue du croisement entre 'Bicané', variété à fleurs femelles et 'Muscat de Hambourg'. Elle produit un raisin blanc de table, de maturité relativement tardive, doté d'un goût légèrement muscaté. Cette variété principalement cultivée en Italie, connaît un grand succès commercial et constitue l'essentiel des importations de raisin de table en France.

1939, **'Cardinal'** (USDA, Californie, États-Unis), variété produisant un raisin noir de table de maturité très précoce. Cette variété est cultivée en France et un peu partout dans le monde. Elle est donnée comme issue d'un croisement entre 'Ahmeur bou Ahmeur' et 'Alphonse Lavallée', mais cette origine a été démentie par les données de la biologie moléculaire.

1982, **'Caladoc'** (INRA, France), variété produisant un raisin noir de cuve. Elle est issue du croisement intraspécifique entre 'Grenache Noir' et 'Cot'. Caractérisé par une bonne tolérance vis-à-vis de nombreux parasites et par un potentiel technologique élevé (tannins et anthocyanes), 'Caladoc' permet d'élaborer seul ou en assemblage des vins rouges de qualité, mais est plus particulièrement apprécié en rosé. En 2000, ce cépage était au 14^e rang des cépages les plus multipliés en France, mais son développement est actuellement freiné par la concurrence de 'Marselan', autre variété INRA (cf. ci-contre).

1988, **'Perdin'** (INRA, France), variété d'origine interspécifique produisant un raisin blanc de table. Sa précocité est un facteur favorable à la culture dans le nord de la France. Classée variété d'agrément, son raisin n'est pas commercialisable. Cette variété convient donc aux jardiniers amateurs car, résistante au mildiou et à l'oïdium, elle ne nécessite que peu de traitements phytosanitaires.

1990, **'Ora'** (INRA, France), variété produisant un raisin blanc de table, à grosses baies de maturité très précoce. Elle est issue d'un croisement complexe entre 'Cinsaut', 'Perle de Csaba' et 'Cardinal'. Son développement est malheureusement freiné par la crise qui touche actuellement la production de raisin de table en France.

1990, **'Danuta'** (INRA France), variété produisant un raisin blanc de table, caractérisée par des grosses baies apyrènes (sans recours aux traitements à l'acide gibbérellique). Elle est issue du croisement entre 'Dattier de Beyrouth' et 'Sultana moscata' (ou '75 Pirovano'), variété apyrène d'origine italienne, elle-même issue du croisement entre 'Muscat d'Alexandrie' et 'Sultanine blanche'.

1990, **'Exalta'** (INRA, France), variété produisant un raisin blanc de table qui se caractérise par son goût muscaté très prononcé. Cette variété est issue d'un croisement entre 'Muscat de Hambourg' et 'Perlette', variété apyrène d'origine californienne (université de Davis) elle-même issue du croisement entre 'Muscat Reine des Vignes' et 'Sultanine blanche'. Mais, la présence d'ébauches de pépins très perceptibles dans des baies de taille moyenne ne lui a pas permis d'être inscrite au catalogue officiel français comme variété apyrène, à la différence de 'Danuta'.

1991, **'Marselan'** (INRA, France), variété produisant un raisin noir de cuve. Elle est issue d'un croisement intraspécifique entre 'Cabernet-Sauvignon' et

‘Grenache Noir’ et possède une tolérance élevée vis-à-vis de nombreux parasites et ravageurs, notamment la pourriture grise et les acariens. Du fait de la taille réduite de ses baies, de sa richesse en anthocyanes et de la finesse de ses tannins, ‘Marselan’ permet d’élaborer, seul ou en assemblage, des vins de très grande classe, aptes au vieillissement. Classée recommandée en 1997, cette variété connaît actuellement un développement prometteur.

1996, **‘Prima’** (INRA, France), variété produisant un raisin noir de table à grosses baies, de maturité plus précoce que celle de ‘Cardinal’. Elle est issue d’un croisement de la variété INRA ‘Lival’ (‘Lignan’ × ‘Alphonse Lavallée’) par ‘Cardinal’. Initialement prometteur, le développement de ‘Prima’ souffre, comme celui d’‘Ora’, de la crise qui frappe la production de raisin de table en France.

1997, **‘Folignan’** (INRA, France), variété issue d’un croisement entre ‘Ugni-Blanc’ et ‘Folle blanche’. Elle a été sélectionnée pour la production de vin destiné à l’élaboration du cognac. Autorisée dans un premier temps pour la production de vins blancs secs, elle a été autorisée par décret en septembre 2005 pour la production de cognac et pourra être introduite dans l’aire d’appellation à hauteur de 10 % de l’encépagement.

Porte-greffe

1880-1885, **‘Rupestris du Lot’** (France), un des premiers porte-greffe utilisés en France. Il provient d’une sélection effectuée dans des populations issues de graines importées des États-Unis. Recommandé à l’époque pour les terres légères, caillouteuses et sèches, il n’est pratiquement plus multiplié en France à l’heure actuelle.

1880-1885, **‘Riparia Gloire de Montpellier’** (France), porte-greffe provenant, comme le précédent, d’une sélection dans des populations issues de graines importées des États-Unis. Son succès fut immense au moment de la reconstitution du vignoble phylloxéré. On estime que ‘Riparia Gloire’ et les autres variétés de *Vitis riparia* ont été utilisées pour reconstituer près de 500 000 ha sur les 700 000 qui furent replantés jusqu’en 1896. Son intérêt a beaucoup diminué depuis, mais il continue d’être utilisé dans certains vignobles sur sols non calcaires, notamment dans le Médoc.

1881, **‘3309 Couderc’** (G. Couderc, France), un des premiers porte-greffe obtenus par hybridation. Issu d’un croisement *V. riparia* × *V. rupestris*, il est bien adapté à de nombreux types de sols peu ou pas calcaires et est actuellement le 3^e porte-greffe français.

1890, **‘41B’** (A. Millardet et de Grasset, France), porte-greffe très résistant au calcaire obtenu par un croisement interspécifique (*V. vinifera* [‘Chasselas’] × *V. berlandieri*) réalisé en 1882. ‘41B’ a permis de reconstituer notamment les vignobles de Cognac et de Champagne, en dépit d’une résistance au phylloxéra très moyenne. Bien que son utilisation ait beaucoup régressé, il reste le 5^e porte-greffe français.

1892 **'140 Ruggeri'** (A. Ruggeri, Italie), porte-greffe issu d'un croisement *V. berlandieri* × *V. rupestris* réalisé en Sicile. Il a été introduit en France dans les années 1960, *via* la Tunisie, l'Algérie et le Maroc. Doté d'une très grande résistance à la sécheresse et au calcaire, il est actuellement le 4^e porte-greffe français.

1912, **'110 Richter'** (L. Ravaz, France), porte-greffe issu d'un croisement *V. berlandieri* × *V. rupestris* réalisé à l'École nationale d'agriculture de Montpellier en 1902. Cette variété est dotée d'une résistance élevée à la sécheresse qui en fait un des porte-greffe les mieux adaptés aux vignobles méridionaux et qui le classe au 2^e rang des porte-greffe français.

1922 **'SO4'** (Teleki, Hongrie), porte-greffe qui est en réalité une sélection réalisée en Allemagne à l'École de viticulture d'Oppenheim, sur l'hybride *V. berlandieri* × *V. riparia* n° 4 de Teleki, d'où sa dénomination simplifiée. Introduit en France en 1941, il a connu rapidement un grand succès et est toujours le 1^{er} porte-greffe français.

1973, **'Fercal'** (INRA, France), variété issue du croisement entre deux variétés F₁ de *V. vinifera* × *V. berlandieri*. C'est le porte-greffe de vigne le plus résistant au calcaire. Il est beaucoup plus résistant au phylloxéra que '41B', mais se montre sensible à la carence magnésienne. En progression constante et régulière, il est classé 6^e en terme de multiplication et talonne '41B'.

1982, **'Gravesac'** (INRA, France), variété issue du croisement entre '161-49 Couderc' (*V. riparia* × *V. berlandieri*) et '3309 Couderc'. Initialement sélectionné pour les sols de graves acides, d'où son nom, ce porte-greffe s'avère bien adapté à de nombreux types de sols peu ou pas calcaires sur lesquels il peut se substituer avec profit à '3309 Couderc'. En progression constante et régulière comme 'Fercal', il est classé 8^e en terme de multiplication.

Remarque. La sélection a permis de créer de nouvelles variétés et de relancer la culture de certains cépages anciens qui avaient pratiquement disparu. Malgré ces efforts, une baisse de la variabilité est néanmoins observée chez *Vitis vinifera*. Parmi les événements responsables, citons :

- le gel de 1709. Il a pu faire disparaître de nombreux cépages, avant que les travaux des ampélographes du XIX^e siècle n'aient permis de les identifier, et peut-être certains ancêtres de cépages actuels plus ou moins renommés ;
- le phylloxéra. Après la crise, il a fallu reconstituer rapidement le vignoble français, ce qui a conduit à l'élimination de nombreux cépages trop peu productifs ou mal adaptés au greffage ;
- l'uniformisation de l'encépagement. La diversité de l'encépagement français diminue inexorablement au profit de quelques « cépages internationaux » dont quatre ('Cabernet-Sauvignon', 'Chardonnay', 'Merlot', 'Syrah') représentaient plus de 32 % du vignoble français en 2003. Cette uniformisation est principalement la conséquence de la mondialisation du commerce des vins et de la limitation du choix de l'encépagement instaurée dans certains vignobles d'AOC (*cf.* encadré ci-contre) ;

Une Appellation d'origine contrôlée (AOC) peut conduire à une limitation du nombre de variétés : exemple du vignoble de Cahors

Avant la création de l'Appellation d'origine - Vin délimité de qualité supérieure (AO-VDQS) « Cahors », 15 à 20 cépages différents de vigne étaient cultivés dans la région de Cahors (Lot). Sa création en 1951 a entraîné une forte réduction du nombre de cépages, puisque seulement 6 d'entre eux ont été autorisés ('Cot', 'Jurançon Noir', 'Valdiguié', 'Abouriou', 'Semillon' et 'Mauzac'). Avec la création de l'AOC « Cahors » en 1971 et sa modification en 1979, le nombre de cépages autorisés a été réduit à 4 ('Cot', 'Jurançon Noir', 'Merlot' et 'Tannat').

– la diminution du nombre de clones cultivés par cépage. Le nombre de clones réellement utilisés dans la pratique viticole est très variable selon les cépages, mais généralement faible, y compris pour des cépages comme 'Pinot noir' où le nombre de clones officiellement inscrits au catalogue officiel est élevé. Un cas extrême est représenté par 'Riesling', pour lequel un seul clone assurait 78 % de la multiplication en 1999. Pour remédier à de telles situations, la sélection de nouveaux clones est indispensable, en particulier sur des critères qualitatifs.

En revanche, les travaux de sélection basés sur l'hybridation interspécifique ont permis de générer une variabilité génétique considérable qui a conduit à la reconstitution post-phyllloxérique du vignoble par l'utilisation des porte-greffe. Quant à la sélection d'hybrides résistants aux parasites cryptogamiques, si elle s'est traduite en France par un échec cultural, elle a néanmoins abouti à un certain nombre de variétés qui ont été et sont toujours utilisées comme géniteurs dans de nombreux programmes de sélection en Europe et en Amérique du Nord.

Regard sur 50 ans de sélection

La plupart des cépages actuellement cultivés sont très anciens. L'origine de certains, probablement issus de croisements spontanés avec des vignes sauvages, reste, jusqu'à présent, inconnue. Les techniques de biologie moléculaire ont montré que de nombreux autres sont issus de croisements dirigés effectués à partir du Moyen Âge, ou peut-être même à l'époque romaine. Même si elle n'a pas laissé de traces écrites avant le XIX^e siècle, la sélection de la vigne a donc été un processus continu.

La crise du phylloxéra a profondément bouleversé et marqué l'histoire de la viticulture française et ses conséquences sont toujours perceptibles : ainsi, depuis plus d'un siècle, la quasi-totalité du vignoble français est greffée, ce qui a entraîné le développement d'une filière professionnelle particulière, producteurs de bois et pépiniéristes, dont les intérêts ne coïncident pas toujours avec ceux des viticulteurs, notamment au niveau des exigences de qualité sanitaire du matériel végétal. Ainsi, au sein de l'Office national interprofessionnel des vins (ONIVINS), il existe un conseil spécialisé des bois et plants de vigne, composé notamment de représentants des deux professions, qui est chargé d'aplanir les difficultés éventuelles.

Influence de l'AOC sur la sélection

Après une période de pénurie causée par l'épidémie de phylloxéra, la replantation massive d'hybrides producteurs directs (HPD) a conduit à une période de surproduction au début du ^{xx}e siècle. En 1935, les AOC ont été créées afin d'orienter la production vers l'élaboration de vins de qualité. Cette mesure a été très efficace, puisqu'elle a stimulé l'arrachage de milliers d'hectares de variétés hybrides donnant des vins de qualité médiocre. Pour être cultivée, une nouvelle variété doit être préalablement inscrite au catalogue officiel des espèces et variétés cultivées. Le franchissement de cette étape, très longue dans le cas de la vigne, n'est pas suffisant pour permettre le développement d'une nouvelle variété, contrairement à la plupart des autres espèces cultivées. En effet, pour bénéficier de primes à la plantation et avoir le droit de produire un vin de pays, il faut aussi que la nouvelle variété figure sur la liste des variétés classées « recommandées », ce qui nécessite au minimum 5 ans d'attente après l'inscription. Après ce stade, la nouvelle variété ne peut cependant pas être utilisée pour la production de vin d'AOC. À chaque AOC correspond, en effet, une liste des cépages cultivables. Jusqu'à présent, aucune nouvelle variété issue de croisement n'a pu être ajoutée en application du principe de « respect des usages locaux, loyaux et constants », mais le Comité national de l'Institut national des appellations d'origine (INAO) n'exclut pas la possibilité d'ajouter un ou plusieurs cépages à la liste d'une AOC déterminée. Ainsi, 'Folignan' une nouvelle variété sélectionnée par l'INRA vient d'être autorisée par décret à entrer dans l'encépagement de l'AOC Cognac.

En matière de vigne en France, l'innovation variétale est donc soumise à un système de triple évaluation. Cette réglementation est particulière à la France tandis qu'en Allemagne, par exemple, des variétés portant dans leur ascendance des espèces nord-américaines et asiatiques servent à la production de « Vins de qualité produits dans des régions déterminées » (VQPRD), une des deux grandes classes regroupant les vins dans la réglementation européenne.

En France, l'INRA est, depuis sa création, le seul établissement à conduire des travaux de sélection variétale sur la vigne (raisin de cuve, raisin de table et porte-greffe). La sélection clonale (sélection génétique et sélection sanitaire) qu'il a mis en place au lendemain de la seconde guerre mondiale, est réalisée depuis 1962 en collaboration étroite avec l'ENTAV et de nombreux organismes professionnels régionaux, notamment les Chambres d'agriculture.

Caractères importants améliorés

Vigne à raisin de cuve

Diversification. Les cépages actuellement cultivés le sont, pour la plupart, depuis plusieurs siècles. La création récente de nouvelles variétés a néanmoins permis de diversifier les produits. Mais, le système de classement départemental entre variétés recommandées et autorisées et surtout les décrets d'AOC qui réglementent strictement leur encépagement peuvent être un frein au développement des nouvelles variétés et plus généralement, aux recherches sur l'amélioration de la vigne (*cf.* encadré ci-dessus).

Assainissement. En parallèle à la sélection variétale, la sélection clonale a permis d'assainir la plupart des cépages. En 2000, sur 207 cépages cultivables en France,

Importance de l'hybridation interspécifique chez la vigne

L'hybridation interspécifique est à l'origine des porte-greffe résistants au phylloxéra. Elle a ainsi contribué à sauver le vignoble français lors de l'invasion phylloxérique. Certaines espèces nord-américaines comme *V. riparia* et *V. rupestris* sont effectivement résistantes au phylloxéra, mais il a fallu les croiser avec *V. berlandieri* pour obtenir des porte-greffe qui soient également tolérants au calcaire.

L'hybridation interspécifique a fourni aussi de nombreuses variétés de raisin de cuve, ainsi que quelques variétés de raisin de table. Au XIX^e siècle, de nombreuses variétés hybrides ont été créées aux États-Unis et acclimatées en France. Ces variétés se caractérisaient par une résistance élevée aux bio-agresseurs (phylloxéra, oïdium, mildiou,...) mais aussi malheureusement par la piètre qualité de leur vin.

Au début du XX^e siècle, le vin produit à partir de certaines variétés nord-américaines issues d'hybridations interspécifiques complexes *V. labrusca* × *V. riparia* × *V. vinifera* était suspecté de « rendre fou ». La fermentation des parois cellulaires de ce type de raisin générait de l'alcool méthylique en quantité non négligeable. Ces variétés ont été interdites en France en 1934.

En 1958, 30 % du vignoble français était constitué d'hybrides interspécifiques créés en France et appelés « hybrides producteurs directs » (HPD). Elles ont été pour la plupart obtenues par des hybrideurs français ('Seibel', 'Seyve-Villard') et présentent une bonne résistance à l'oïdium et au mildiou tout en produisant un vin de table de qualité acceptable pour certaines d'entre elles. La création des AOC en 1935 et l'instauration du système de classement des variétés en 1955 ont très fortement fait reculer les surfaces cultivées en variétés hybrides (de 400 000 ha en 1958 à moins de 10 000 ha actuellement). Une vingtaine seulement de ces dernières sont encore classées autorisées (abattement de 30 % sur les droits de plantation) et une seule est classée recommandée ('Baco Blanc', pour la fabrication d'Armagnac).

Le fait que les premiers hybrides américains donnent un vin exécrable et le poids des traditions en viticulture, sont à la base du rejet des hybrides par les vignerons français. C'est aussi pour cette raison que, dans la pratique, les nouvelles variétés INRA obtenues par croisement intraspécifique ne sont pas appelées hybrides, mais « métis ».

132 avaient bénéficié de cette sélection qui a effectivement conduit à la mise en culture de clones certifiés indemnes de maladies virales graves, mais qui a, dans certains cas, été critiquée. En effet, la productivité des clones issus de la sélection clonale pratiquée dans les années 1960-1970 était trop élevée. La sélection clonale est actuellement poursuivie sur des critères beaucoup plus qualitatifs.

Vigne à raisin de table

Diversification. Les variétés pour la production de raisin de table, sélectionnées récemment, apportent une certaine diversification dans les produits proposés aux consommateurs. Le fait le plus remarquable est sans doute la création de variétés apyrènes pour lesquelles il n'est plus nécessaire de pratiquer des traitements hormonaux (alors qu'ils sont nécessaires pour la variété 'Sultanine'). Ce type de raisin est intéressant car il est adapté à de nombreuses utilisations : raisin de table, salade de fruits, raisin sec et confiserie.

Porte-greffe

Adaptation aux conditions pédoclimatiques françaises. La sélection sanitaire et, dans certains cas, le recours à la thérapie ont conduit à ne diffuser que des plants indemnes de viroses graves, ce qui a permis d'améliorer considérablement la qualité des porte-greffe utilisés pour la plupart depuis plus d'un siècle. Par ailleurs, de nouveaux porte-greffe adaptés à différentes conditions pédo-climatiques françaises ont été récemment créés. C'est ainsi que deux variétés, l'une remarquablement tolérante aux sols calcaires, l'autre particulièrement adaptée aux sols acides sont maintenant disponibles.

Difficultés ou obstacles

Les variétés hybrides interspécifiques pour la production de raisin de cuve, bien que résistantes à de nombreux bio-agresseurs, n'ont pas eu de succès durable du fait de la mauvaise qualité du vin produit (cf. encadré p. 771) et de leur résistance insuffisante au phylloxéra.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	Toute la variabilité clonale
Mutagenèse induite	AUCUNE en France OUI en Russie La variété russe 'Fikreti', obtenue en 1986 et se caractérisant par une grande précocité, est issue de mutagenèse aux rayons γ.
Croisements interspécifiques	OUI Variétés de cuve Croisements spontanés : <i>V. labrusca</i> × <i>V. vinifera</i> ('Isabelle', 'Concord'). Croisements dirigés : plusieurs centaines d'hybrides producteurs directs et dérivés. Porte-greffe <i>V. vinifera</i> × <i>V. berlandieri</i> ('41B', 'Fercal'). <i>V. riparia</i> × <i>V. rupestris</i> ('3309 Couderc', '101-14 Millardet et de Grasset'). <i>V. berlandieri</i> × <i>V. rupestris</i> ('99 Richter 99', '110 Richter', '140 Ruggeri'). <i>V. riparia</i> × <i>V. berlandieri</i> ('SO4', '161-49 Couderc', '5BB', '5C', 'RSB1', '420 A Millardet et de Grasset'). ESSAIS Variétés de cuve Introgression de la résistance à l'oïdium (gène <i>Run1</i>) et au mildiou (gène <i>Rpv1</i>) à partir de <i>Vitis</i> (<i>Muscadinia</i>) <i>rotundifolia</i> . Porte-greffe Introgression de la résistance à <i>Xiphinema index</i> , nématode vecteur du GFLV, à partir de <i>Vitis</i> (<i>Muscadinia</i>) <i>rotundifolia</i> .
Hybridation somatique	AUCUNE

suite...

... suite

Élévation du niveau de ploïdie	OUI Les Japonais ont sélectionné des variétés tétraploïdes pour la production de raisin de table qui se distinguent par de grosses baies mais qui ont l'inconvénient d'être peu fertiles. 'Léopold III' est issue de la tétraploïdisation de la variété 'Alphonse Lavallée'.
Transgénèse	1^{res} plantes transgéniques. La transgénèse a été réalisée la première fois sur cette espèce en 1990 en Californie. En France, les premières plantes transgéniques de vigne ont été obtenues en 1994 ; il s'agissait de porte-greffe. Essais au champ et commercialisation. Il n'existe pas de variétés de vigne transgénique autorisées à la commercialisation dans le monde bien que de nombreux essais aient été réalisés. En 2000, plus de vingt essais de vigne transgénique ont été effectués aux États-Unis (cf. encadré p. 775). Des essais sont aussi réalisés en Afrique du Sud, en Australie, en Italie et en Allemagne. Caractères travaillés. La transgénèse, pourrait permettre, d'introduire des résistances aux maladies dans les variétés sans modifier fondamentalement leurs autres caractéristiques (cf. encadré p. 774).

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Le greffage est obligatoire pour toutes les variétés de <i>Vitis vinifera</i> pour résister au phylloxéra. La conservation des ressources génétiques par micro-bouturage <i>in vitro</i> est passée dans la pratique.
Sélection sanitaire	OUI La thérapie thermique est utilisée pour éliminer les virus. La culture de méristèmes <i>in vitro</i> et la thérapie thermique ont été utilisées dans des cas relativement rares pour assainir des cépages : ainsi, 'Savagnin rose', cultivé sur une très petite surface et dont il ne restait plus aucun pied sain. Des plantes variantes (c'est-à-dire non conformes au matériel de départ) sont souvent obtenues après culture de méristèmes. Le microgreffage d'apex <i>in vitro</i> présente l'avantage de générer moins de variants que la culture de méristèmes.
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Culture d'embryons <i>in vitro</i>	OUI Le sauvetage d'embryons <i>in vitro</i> est couramment utilisé dans la sélection de variétés de raisin de table sans pépin (croisement entre variétés apyrènes).
Marquage moléculaire	OUI Des marqueurs moléculaires sont utilisés pour l'identification variétale, pour l'analyse de la diversité génétique, pour la recherche de l'origine des cépages et pour l'établissement de cartes génétiques destinées à la recherche de QTL.

suite...

... suite

Des marqueurs du gène *sdl* (*seed development Inhibitor*, inhibiteur de développement de la graine) ont été découverts et sont en cours d'utilisation pour la création de nouvelles variétés de raisin de table sans pépin. De même, des marqueurs des gènes *Run1* et *Rpv1* sont disponibles pour faciliter leur introgression ou leur clonage positionnel.

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	La sélection clonale à l'intérieur des cépages cultivés traditionnellement est la méthode la plus couramment utilisée. Pour le cépage 'Cabernet Sauvignon' par exemple, 25 clones ont été agréés (le clone 15 est certainement un des plus plantés). La sélection à l'intérieur de populations issues d'hybridation intraspécifique a permis d'obtenir des variétés à raisin de cuve ('Caladoc', 'Marselan') ou de table ('Ora', 'Danuta', 'Prima'). La sélection à l'intérieur de populations issues d'hybridation interspécifique a permis d'obtenir des porte-greffe ('Fercal', 'Gravesac').
Types variétaux	Variété polyclonale ou monoclonale La plupart des porte-greffe sont des clones d'hybrides interspécifiques. Les variétés à raisin de cuve sont principalement des variétés polyclonales (anciennes) et plus rarement des variétés monoclonales (récentes). Les variétés à raisin de table sont principalement des variétés monoclonales (récentes) et plus rarement des variétés polyclonales (anciennes).

Porte-greffe de vigne transgénique en France

Les premiers essais de porte-greffe transgéniques potentiellement résistants au virus du court-noué GFLV (*Grapevine fanleaf virus*) ont été mis en place en 1997 dans une parcelle contaminée située dans les vignobles Moët & Chandon d'Épernay (Marne), et dans une parcelle saine située sur le Centre INRA de Colmar (Haut-Rhin). En 1999, la société champenoise a arraché, sous le contrôle des autorités nationales compétentes, la totalité des pieds déjà plantés et a renoncé à poursuivre l'expérimentation de nouveaux plants transgéniques. En 2001, sous la pression d'un syndicat agricole opposé à l'expérimentation des OGM, l'INRA a pris la décision de ne pas reprendre à son compte l'expérimentation interrompue par la Société Moët & Chandon et d'arracher la parcelle de Colmar. En 2003, suivant les recommandations d'un groupe de réflexion indépendant associant chercheurs, viticulteurs et consommateurs, l'INRA a décidé de reprendre les essais sur son site de Colmar, pour une durée limitée à 5 ans, avec des objectifs purement scientifiques excluant toute perspective de création variétale. Si la filière de multiplication de la vigne (pépiniéristes) affiche son soutien aux recherches sur les vignes transgéniques, de nombreux viticulteurs ne cachent pas leur opposition, relayés en cela par le Comité national des AOC.

Entre temps, une nouvelle directive relative à la commercialisation des matériels de multiplication végétative de la vigne (2002/11/CE) a modifié l'ancienne directive (68/193/CEE) vieille de 34 ans, en intégrant notamment les dispositions de la directive 2001/18/CE concernant la dissémination des OGM dans l'environnement. La publication de cette directive a suscité l'inquiétude d'une partie de la filière vitivinicole. L'essai a été mis en place en 2005.

Les essais de vigne transgénique aux États-Unis

Les essais portent essentiellement sur des porte-greffe transgéniques chez lesquels la résistance aux virus du court-noué (GFLV) et celle de l'enroulement de la vigne (GLRaV) sont recherchées, grâce notamment à l'introduction dans la plante des gènes codant les capsides protéiques de ces virus (résistance dérivée de l'agent pathogène). D'autres essais concernent la résistance aux maladies cryptogamiques (mildiou, oïdium et *Botrytis cinerea*) qui est recherchée chez les variétés de *Vitis vinifera* par l'expression de gènes codant des chitinases ou glucanases, enzymes capables de dégrader le mycélium des champignons. Un autre objectif consiste à obtenir des vignes moins sensibles à la maladie de Pierce (causée par la bactérie *Xylella fastidiosa*) par l'introduction de gènes codant des peptides lytiques. Des recherches sont aussi conduites sur l'acquisition de résistances à *Agrobacterium tumefaciens*, responsable de tumeurs au collet (également appelées broussins), par le blocage de la transcription (*silencing*) des oncogènes ou des gènes de virulence *Vir* de la bactérie, ainsi que par l'acquisition de résistances au phylloxéra par l'expression d'un gène codant pour une lectine entomopathogène.

Perspectives d'amélioration

Dans un contexte où il existe déjà de nombreuses variétés, où la tendance est à une uniformisation des cépages cultivés et où une variété ne peut pleinement se développer que si elle est autorisée dans une AOC, les perspectives d'amélioration de la vigne pour le raisin de cuve semblent limitées. Cependant, le développement souvent épidémique de nombreux parasites et ravageurs et l'interdiction récente ou dans un avenir proche de certains produits phytosanitaires jugés dangereux pour l'environnement et la santé, risquent d'avoir à court terme des conséquences dramatiques sur la pérennité des vignobles et la qualité des vins produits.

La sélection de variétés résistantes est donc devenue un objectif prioritaire dans les pays viticoles à forte pression parasitaire et correspond souvent à des exigences agro-environnementales de plus en plus grandes (exemples de l'Allemagne ou de la Suisse). C'est aussi un objectif prioritaire dans des pays viticoles à faible pression parasitaire (notamment ceux de l'hémisphère austral) qui correspond, dans ce cas, à la volonté de pouvoir disposer sur les marchés internationaux d'arguments commerciaux (vins « zéro résidu ») qui seront de plus en plus pris en compte.

De plus, les modifications climatiques en cours, même si leurs effets se font sentir à plus long terme, risquent d'avoir également de graves conséquences (découplage des facteurs pédoclimatiques) sur l'adaptation des cépages à leurs terroirs, résultat d'une sélection empirique menée souvent sur plusieurs siècles. On peut donc craindre, dans les prochaines années, l'amorce d'une modification significative de la géographie viticole mondiale et une perte de typicité de certains vins indissociablement liés à des terroirs particuliers et élaborés avec des cépages considérés jusqu'à présent comme intangibles (par exemple, 'Pinot noir' et 'Chardonnay' en Bourgogne). Les conséquences pourraient en être minimisées par un renouvellement variétal incomparablement plus important que ce qu'il a été dans les décennies précédentes. Or, le délai minimal nécessaire pour créer une nouvelle variété de vigne est de trente ans.

Caractères à améliorer

Vigne à raisin de cuve

Résistances aux maladies. C'est une priorité absolue.

Oïdium (*Uncinula necator*) et *mildiou* (*Plasmopara viticola*). Ce sont deux maladies cryptogamiques importantes de la vigne. Les traitements au soufre et au sulfate de cuivre (bouillie bordelaise mise au point par A. Millardet en 1885) et l'utilisation de nombreux fongicides de synthèse à action de contact ou systémique, permettent généralement de prévenir les épidémies, mais sont quelquefois peu efficaces pour les maîtriser après leur déclenchement. Outre un impact défavorable sur l'environnement, la lutte chimique contre ces bio-agresseurs est très onéreuse : par exemple pour le mildiou, il a fallu faire en moyenne 8 traitements en 1999.

Un gène dominant capable de conférer une résistance totale à l'oïdium par hypersensibilité a été identifié chez l'espèce *V. (Muscadinia) rotundifolia*. Ce gène nommé *Run1* (pour résistant à *Uncinula necator*) a été introduit dans *Vitis vinifera* par des croisements successifs avec des variétés différentes pour éviter la consanguinité. Cette introgression est facilitée par l'utilisation de marqueurs moléculaires qui ont servi, en outre, à la cartographie fine du fragment chromosomique qui porte le gène en question. Cette cartographie est la première étape du clonage positionnel du gène *Run1* (actuellement en cours) et de son séquençage qui permettront de l'introduire, par transformation génétique, dans des variétés de grande qualité afin de leur conférer, rapidement et sans bouleversement préjudiciable de leur génome, une résistance élevée à l'oïdium.

Par ailleurs, une résistance totale au mildiou a été également mise en évidence chez *M. rotundifolia*. Cette résistance est conférée par plusieurs gènes à effets additifs dont le plus puissant, nommé *Rpv1* (pour résistant à *Plasmopara viticola*) explique plus de 80 % de la variabilité et a été trouvé étroitement lié au gène *Run1*, ce qui a permis l'introgression simultanée des résistances à l'oïdium et au mildiou dans de nouvelles variétés de *V. vinifera*, actuellement en cours d'expérimentation au vignoble. Le clonage positionnel du gène *Rpv1* et son utilisation en transformation génétique sont également envisagés.

Pour garantir la durabilité de ces résistances, il convient d'associer les gènes *Run1* et *Rpv1* à des gènes codant pour des protéines en relation avec une maladie (*Pathogenesis related proteins*, PRP), ou à des gènes de résistances complémentaires provenant d'autres espèces de *Vitis*. Ceux-ci pourraient être trouvés dans les variétés allemandes telles que 'Régent' ou 'Phoenix', issues du croisement des hybrides interspécifiques français 'Chambourcin' ou 'Villard blanc', qui possèdent une résistance significative au mildiou et à l'oïdium tout en produisant un vin de qualité.

Autres bio-agresseurs. Des maladies endémiques anciennement connues se développent de plus en plus de manière épidémique en entraînant le dépérissement des vignes atteintes et le « mitage » de nombreux vignobles. C'est le cas de la

flavescence dorée, maladie du type jaunisse, causée par un phytoplasme et transmise par une cicadelle *Scaphoideus titanus*, qui impose une lutte chimique préventive et systématique très dommageable pour la faune auxiliaire et l'environnement. C'est également le cas des maladies du bois transmises par les plaies de taille, comme l'eutypiose causée par le champignon *Eutypa lata* et surtout l'esca (ou apoplexie) causée par un complexe fongique au sein duquel *Eutypa lata* joue un des rôles pionniers. L'interdiction récente du seul produit efficace (arsénite de soude) contre l'esca met en évidence la nécessité absolue de trouver rapidement des solutions génétiques qui passeront probablement par le recours à la transgénèse.

Qualité. Une diversification dans les couleurs, arômes et tannins est à rechercher pour produire des vins possédant des typicités originales et différentes.

Vigne à raisin de table

Résistances aux maladies (*cf.* : vigne à raisin de cuve). La création de variétés résistantes permettra de réduire les taux de résidus pesticides sur les baies en augmentant ainsi leur qualité hygiénique et l'attractivité commerciale du produit.

Qualité. L'obtention de raisins sans pépin et dotés d'un arôme muscaté est l'objectif principal.

Porte-greffe

Résistances aux maladies. Des résistances aux parasites transmis par voie végétative et par des vecteurs (aériens ou telluriques) doivent rapidement être trouvées (*cf.* : vigne à raisin de cuve). La première cible est le court-noué, maladie causée par un virus (*Grapevine fanleaf virus*, GFLV) transmis par le nématode *Xiphinema index*. L'espèce *V. (Muscadinia) rotundifolia* (la vigne « muscadine ») est très résistante à ce nématode et corrélativement à la transmission du virus. Bien qu'elle soit également très résistante au phylloxéra, cette espèce n'est pas utilisable directement comme porte-greffe du fait de son extrême sensibilité à la chlorose calcaire, du non-enracinement de ses boutures ligneuses et surtout de son incompatibilité au greffage avec *V. vinifera*. Des croisements ont été réalisés entre ces deux espèces et les hybrides F₁ obtenus, bien qu'extrêmement stériles, ont pu être recroisés avec des porte-greffe classiques. Cette stratégie a permis d'obtenir un nouveau porte-greffe en cours d'expérimentation qui possède une résistance élevée à la maladie du court-noué sans avoir les défauts de la vigne « muscadine ». L'objectif est maintenant d'introduire par transgénèse (*cf.* encadré p. 775) le gène de la capsid protéique du virus. Cette stratégie est intéressante car elle permettrait de réaliser un porte-greffe cumulant les résistances au vecteur (nématode) et à l'agent infectieux (virus).

Qualité. Les porte-greffe conférant une vigueur faible au greffon assurent généralement à celui-ci une production de qualité. Malheureusement, la plupart des

porte-greffe à faible vigueur conférée sont sensibles à la chlorose calcaire. La sélection doit donc être orientée vers l'association d'une vigueur conférée faible et d'une tolérance élevée au calcaire.

Inscription et protection des variétés en France

1960, ouverture, par arrêté ministériel, du catalogue officiel vigne. Les conditions d'inscription des variétés de vigne (raisin de cuve, raisin de table et porte-greffe) y sont décrites.

1995, parution, par arrêté ministériel, des variétés de vigne inscrites au catalogue officiel. Cet ouvrage présente leurs classements dans les différents départements et les caractéristiques des principaux clones disponibles.

1998, modification, par deux arrêtés ministériels, du classement des variétés réalisé en 1995.

Entre 1976 et 2003, 20 variétés à raisin de cuve, 17 variétés à raisin de table, 4 variétés d'agrément et 2 variétés porte-greffe ont été inscrites au catalogue officiel français, mais, à l'exception des porte-greffe, le développement de beaucoup d'entre elles a été souvent limité. L'inscription d'une variété repose sur une analyse DHS et une VAT. Il existe une cinquantaine de critères morphologiques qui permettent de décrire efficacement une variété suivant les principes directeurs de l'UPOV. La possibilité d'utiliser des résistances aux maladies comme critères de distinction est en cours de discussion au sein du CTPS. Les épreuves de DHS, réalisées au Domaine INRA de Vassal pour le compte du GEVES, sont effectuées pendant une durée minimale de 2 ans de production significative. Au moment de l'inscription, la fiche descriptive de chaque nouvelle variété est établie. Cette fiche, accompagnée de l'échantillon de référence, permet de juger de la conformité des lots commerciaux dans le cadre de la certification des plants. L'examen DHS constitue également la base technique pour délivrer un titre de protection (appelé COV) à l'obteneur, lui conférant une exclusivité d'exploitation de sa variété pendant une durée de 25 ans, ce qui est très court pour une plante pérenne comme la vigne dont les nouvelles variétés se développent très lentement. Délivrée par le CPOV, la protection a une portée nationale. Le titre délivré par l'OCVV octroie une protection sur l'ensemble des états de l'Union européenne.

Pour être inscrite, la variété doit également répondre aux critères de valeur agronomique et technologique requis (VAT). L'analyse VAT comprend des évaluations agronomiques et œnologiques par rapport à des témoins de référence. Comme la vigne n'est productive qu'après 3 ans et que les examens VAT doivent être menés au minimum sur 5 ans, l'expérimentation d'une nouvelle variété de vigne aux fins d'inscription est donc un processus assez long (8 ans). Après son inscription, la variété est classée dans la catégorie « autorisée provisoirement » pendant une durée minimale de 5 ans. À l'issue de cette

période, elle est à nouveau présentée au CTPS pour être classée définitivement dans la catégorie « recommandée », dans des zones de culture définies au niveau départemental, ce qui lui ouvre l'accès aux primes de plantation.

La coexistence d'une sélection variétale (création de nouvelles variétés) et d'une sélection clonale (sélection de nouveaux clones) est une particularité de la vigne qui peut parfois conduire à une certaine confusion. Ainsi, 'Savagnin Rose' et 'Gewurztraminer' sont deux cépages de cuve qui ne diffèrent que par une intensité d'arôme. À l'inverse, à l'intérieur du cépage 'Chardonnay', il existe un clone au goût musqué qui n'est pas considéré comme une variété différente.

Il existe un système de certification, sous contrôle de l'ONIVINS qui garantit l'authenticité variétale et l'état sanitaire des plants issus de sélection clonale. Toutes les variétés porte-greffe doivent être issues de sélection clonale. Pour les variétés à raisin de cuve, la part du matériel issu de sélection clonale est stabilisée depuis quelques années à 90-93 %, alors que pour les variétés à raisin de table, elle était de 66 % en 2003. Il est intéressant de noter que pour les 6 variétés « internationales » les plus multipliées, la part du matériel d'origine clonale certifié s'élève à plus de 99 %, tandis que pour la variété 'Pinot noir' qui dispose pourtant du plus grand nombre de clones agréés (40), le pourcentage n'excède pas 90 %.

Pour en savoir plus

Adam-Blondon A.-F., Lahogue F., Esnault R., Bouquet A., Boursiquot J.-M. et This P., 2001. Usefulness of two SCAR markers for marker-assisted selection of seedless grapevine cultivars. *Vitis*, 40, 147-155.

Adam-Blondon A.-F., Roux C., Claux D., Butterlin G., Merdinoglu D. et This P., 2004. Mapping 245 SSR markers on the *Vitis vinifera* genome : a tool for grape genetics. *Theor. Appl. Genet.*, 109, 1017-1027.

Bouquet A., 2002. 1962-2002 : 40 ans de progrès génétique et sélection de la vigne. *Sél. Fr.*, 109-115.

Bouquet A., Adam-Blondon A.-F. et Schneider C., 2001. Métis ou hybrides : des variétés nouvelles pour une viticulture de qualité. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 109-115.

Bouquet A. et Boursiquot J.-M., 1999. La sauvegarde des vieux cépages et la création de variétés nouvelles : une démarche conjointe pour concilier tradition et innovation en France. *Progr. Agric. Vitic.*, 116 (19), 416-422.

Bouquet A., Danglot Y., Bongiovanni M., Castagnone Sereno P., Torregrosa L. et Boursiquot J.-M., 2000. Breeding rootstocks resistant to grape fanleaf virus spread, using *Vitis* × *Muscadinia* hybridization. *Acta Hort.*, 517-526.

Bouquet A., Pauquet J., Adam-Blondon A.-F., Torregrosa L., Merdinoglu D. et Wiedemann-Merdinoglu S., 2000. Vers l'obtention de variétés de vigne résistantes à l'oïdium et au mildiou par les méthodes conventionnelles et biotechnologiques. *Progr. Agric. Vitic.*, 117 (18), 383-389.

Boursiquot J.-M. et Bouquet A., 2000. Development of methods for the conservation and the management of grape genetic resources. *Acta Hort.*, 31-36.

Bowers J., Boursiquot J.-M., This P., Chu K., Johansson H. et Meredith C., 1999. Historical Genetics : the parentage of Chardonnay, Gamay, and other wine grapes of north-eastern France. *Science*, 285, 1562-1565.

- Bowers J. et Meredith C.**, 1997. The parentage of a classic wine grape, Cabernet-Sauvignon. *Nat. Genet.*, 16, 84-87.
- Galet P.**, 2000. *Dictionnaire encyclopédique des cépages*. Hachette, Paris, 935 p.
- Lavignac G.**, 2001. *Cépages du Sud-Ouest, 2000 ans d'histoire. Mémoires d'un ampélographe*. Éditions du Rouergue / INRA Éditions, Paris, 272 p.
- Merdinoglu D., Butterlin G., Baur C. et Balthazard J.**, 2000. Comparison of RAPD, AFLP and SSR (microsatellite) markers for genetic diversity analysis in *Vitis vinifera* L. *Acta Hortic.*, 528, 193-197.
- Merdinoglu D., Wiedermann-Merdinoglu S., Coste P., Dumas V., Haetty S., Butterlin G. et Greis C.**, 2003. Genetic analysis of downy mildew resistance derived from *Muscadinia rotundifolia*. *Acta Hortic.*, 603, 451-456.
- ONIVINS**, 2002. *L'histoire de la vigne et du vin*. Paris. Fiche, 2 p.
- Planchon J.-E.**, 1875. *Les vignes américaines : leur culture, leur résistance au Phylloxéra et leur avenir en Europe*. Coulet, Éditeur, Montpellier, 240 p.
- Pouget R.**, 1990. *Histoire de la lutte contre le phylloxéra de la vigne en France*. INRA et OIV Éditions, Paris, 157 p.
- Renaud S.C., Gueguen R., Siest G. et Salomon R.**, 1999. Wine, beer, and mortality in middle-aged men from eastern France. *Arch. Int. Med.*, 13, 159 (16), 1865-1870.
- Siret R., Boursiquot J.-M., Merle M.H., Cabanis J.-C. et This P.**, 2000. Toward the authentication of varietal wines by the analysis of grape (*Vitis vinifera* L.) residual DNA in must and wine using microsatellite markers. *J. Agric. Food Chem.*, 48, 5035-5040.
- Tessier C., David J., This P., Boursiquot J.-M. et Charrier A.**, 1999. Optimization of the choice of molecular markers for varietal identification in *Vitis vinifera* L. *Theor. Appl. Genet.*, 98, 171-177.

Le *Weigela*

Weigela Thumb. spp. ($2n = 2x = 36$)
(Caprifoliacées)

Présentation du genre

Toutes les espèces appartenant au genre *Weigela* Thumb. sont originaires d'Extrême-Orient. Les six espèces *W. japonica* Thumb., *W. hortensis* (Sieb. & Zucc.) K. Koch, *W. floribunda* (Sieb. & Zucc.) K. Koch, *W. coraensis* Thumb., *W. florida* (Bunge) A. DC. et *W. praecox* (Lemoine) L.H. Bailey ont été introduites en Europe à la fin du XIX^e siècle et sont à l'origine de l'ensemble des variétés actuelles. Le nom de *Weigela* vient de C.E. von Weigel (1748-1931) éminent professeur allemand de botanique, chimie, minéralogie et pharmacie.

Les espèces du genre *Weigela* sont allogames à fécondation entomophile et incapables de se croiser spontanément avec des genres voisins de la flore française indigène. Ce sont des espèces pérennes se multipliant spontanément dans la nature par graines et dont les variétés cultivées sont multipliées végétativement par bouturage. Le genre, classé dans la famille des Caprifoliacées a pour proches voisins bien connus les viornes (*Viburnum* L.) et les chèvrefeuilles (*Lonicera* L.).

Il existe une assez grande diversité de *Weigela* dans le monde, plusieurs espèces sont utilisées directement en tant que plantes ornementales avec de multiples possibilités de croisements interspécifiques.

Il y a de nombreuses collections de *Weigela* dans le monde.

Production et utilisation

Le *Weigela* est un arbuste à fleur blanche, rose ou rouge qui s'adapte à de nombreuses conditions pédoclimatiques et qui ne possède pas de bio-agresseurs dommageables. Ces qualités rendent le *Weigela* particulièrement attractif pour les entreprises d'espace vert et les jardiniers amateurs. Le *Weigela* fait d'ailleurs partie des dix arbustes à fleur les plus cultivés.

Histoire des variétés cultivées en France

1880-1915, '**Abel Carrière**', '**Conquête**', '**Le Printemps**', exemples de variétés réalisées par Victor Lemoine à Nancy (Meurthe-et-Moselle), et qui sont encore cultivées de nos jours. Il a débuté la sélection du *Weigela* en produisant une cinquantaine de variétés à partir de croisements interspécifiques entre *W. coraensis* × *W. floribunda*.

1974, '**Pink Princess**' (J.L. Weigle, aux États-Unis), variété nord-américaine se caractérisant par une bonne résistance au froid.

1979, '**Courtatom**' (INRA, France), variété obtenue par mutagenèse induite et se caractérisant par un feuillage panaché. Cette variété est commercialisée sous la marque Couleur d'Automne®.

1980, '**Courtanin**' (INRA, France), variété obtenue par mutagenèse induite et se caractérisant par son nanisme. Cette variété est commercialisée sous la marque Nainrouge®.

1980, '**Courtavif**' (INRA, France), variété obtenue par mutagenèse induite et se caractérisant par la couleur rouge vif de sa fleur. Cette variété est commercialisée sous la marque Rubivif®.

1985, '**Courtalor**' (INRA, France), première variété triploïde. Cette variété est commercialisée sous la marque Carnaval®.

1986, '**Olympiade**' (André Briant Jeunes Plants, France), variété se caractérisant par un feuillage doré. Cette variété est commercialisée sous la marque Briant Rubidor®.

1988, '**Polka**' (Felicita Svejda, Canada), variété se caractérisant par sa résistance indirecte au froid. Du fait de son développement réduit, la plante est recouverte par la neige, ce qui la protège des grands froids. La station expérimentale d'Ottawa a également produit les variétés 'Minnuet' et 'Tango'.

1988, '**Victoria**' (H.Geers Handelskwekerij B.V., Pays-Bas) et '**Alexandra**' (H.Geers Handelskwekerij B.V., Pays-Bas), variétés à port nain et à feuillage pourpre. Ce caractère vient sans doute de la variété 'Purpurea' de *W. florida*.

2000, '**Poppet**' (Arboretum de Pruhonice, Prague, Tchéquie), variété à port compact et à floraison rose.

2004, '**Elvera**' (H.Geers Handelskwekerij B.V., Pays-Bas), autre variété à port compact à feuillage pourpre.

Remarque. La sélection a largement contribué à augmenter la variabilité dans le genre *Weigela* à l'aide de la mutagenèse, des croisements interspécifiques et en faisant varier le niveau de ploïdie.

Regard sur 50 ans de sélection

Le *Weigela* est une plante d'introduction assez récente qui n'avait pas été soumise à une forte pression de sélection. De ce fait, les progrès ont été assez faciles et un programme mené à l'INRA d'Angers (Maine-et-Loire) a permis de renouveler la gamme variétale.

Caractères importants améliorés

Diversification. Avant les années 1980, le marché du *Weigela* était stagnant du fait du manque de diversité des produits proposés aux consommateurs. Les programmes d'amélioration de cette espèce menés dans les années 1980 ont débouché sur des produits nouveaux (des variétés triploïdes, des variétés à port compact, des variétés alliant feuillage pourpre et port compact, etc.) qui ont relancé l'intérêt du marché. La plupart des variétés récentes tentent d'exploiter la version à port compact associé à un feuillage pourpre.

Floraison et fructification. Des plantes tétraploïdes ont été obtenues par le traitement à la colchicine de plantes diploïdes cultivées *in vitro*. Le croisement d'une plante tétraploïde avec une plante diploïde permet d'obtenir des plantes triploïdes. Le *Weigela* triploïde se caractérise par une plus grande floribondité avec une fleur plus grosse. La triploïdie a aussi été introduite dans ce genre pour supprimer la fructification et par voie de conséquence pour réduire les coûts d'entretien en limitant les besoins en taille.

Méthodes utilisées

MÉTHODES D'INDUCTION DE VARIABILITÉ	
Exploitation des mutations spontanées	OUI Elle est limitée à l'exploitation de variétés à feuillage panaché.
Mutagenèse induite	OUI De nombreuses expériences de mutagenèse aux rayons γ associées à l'utilisation de la culture <i>in vitro</i> ont permis d'obtenir des mutants de nanisme, de couleur de la feuille ou de la fleur ('Courtatom', 'Courtanin', 'Courtavif').
Croisements interspécifiques	OUI Les croisements interspécifiques se font facilement au sein du genre <i>Weigela</i> ; ils ont donné naissance à de multiples variétés. Il est assez difficile d'évaluer l'importance du rôle de l'hybridation interspécifique dans l'élaboration des variétés actuelles. Il règne, en effet, une certaine confusion entre les espèces du genre <i>Weigela</i> et même entre le genre <i>Weigela</i> et le genre <i>Diervilla</i> P. Mill.
Hybridation somatique	AUCUNE

suite...

... suite

Élévation du niveau de ploïdie	OUI Les variétés sont majoritairement diploïdes. Cependant, la sélection a permis de créer des variétés triploïdes, situation nouvelle dans le genre <i>Weigela</i> ('Courtared' Lucifer [®] , 'Courtamon' Feline [®] ,...).
Transgénèse	AUCUNE Le <i>Weigela</i> est un genre de trop faible importance économique pour motiver un programme d'amélioration par transgénèse.

MÉTHODES FACILITANT OU ACCÉLÉRANT LA CRÉATION VARIÉTALE

Multiplication végétative	OUI Le <i>Weigela</i> est commercialisé sous forme de clones multipliés végétativement par bouturage.
Sélection sanitaire	AUCUNE
Haploïdisation	AUCUNE
Recours à la stérilité mâle	AUCUNE
Recours à l'auto-incompatibilité	AUCUNE
Marquage moléculaire	AUCUNE

MÉTHODES ET SCHÉMAS DE SÉLECTION ET TYPES VARIÉTAUX

Méthodes et schémas de sélection	Sélection clonale Sélection clonale après mutagenèse. Après mutagenèse, la sélection des mutants les plus intéressants est effectuée. Ceux-ci sont ensuite stabilisés avant d'être multipliés par bouturage. Après hybridation entre clones suivie d'une sélection dans la descendance, les meilleurs clones peuvent être multipliés par bouturage et donner des variétés clonales.
Types variétaux	Variété clonale. Les variétés de <i>Weigela</i> sont souvent des clones issus de croisements intra- ou interspécifiques ou de traitements mutagènes.

Perspectives d'amélioration

L'importance économique relativement faible de cette espèce ne justifie pas le lancement d'un nouveau programme de sélection.

Caractères à améliorer

Couleur jaune. Un beau défi à relever est de réaliser un croisement intergénérique avec le genre *Diervilla* afin d'introduire la teinte jaune dans la palette de couleurs de la fleur du *Weigela*.

Feuillage rouge et fleurs blanches. Les variétés à feuillage pourpre ont toutes des fleurs roses à rouges. Quelques hybrides ont été obtenus dans les années 1980 à Angers. Un petit nombre de clones semblent intéresser les producteurs.

Protection des variétés en France

Il n'existe pas de catalogue officiel dans le cas des arbustes ornementaux. Les variétés modernes sont protégées par COV et dépôt de marques ou par un système équivalent.

La collection de référence pour les examens techniques nécessaires à la délivrance de COV pour l'Union européenne, est gérée par l'Unité du GEVES de Brion, près d'Angers (Maine-et-Loire).

Pour en savoir plus

Decourtye L., 1978. *Weigela* (Thumb.) improvement by mutagenesis : looking for a method. *Ann. Amélior. Plant.*, 28 (6), 697-707.

Decourtye L., 1992. Le *Weigela*. Dans : *Amélioration des espèces végétales cultivées*. A Gallais et H. Bannerot, éd., INRA Éditions, Paris, 538-548.

Duron M., 1975. In vitro culture of some hybrid cultivars of *Weigela* (Thumb.) from meristems. *C.R. Hebd. Séances Acad. Sci., Ser. D. Sci. Nat.*, 281 (14), 985-987.

Duron M., 1992. Induced mutations through EMS treatment after adventitious bud formation on shoot internodes of *Weigela* cv. Bristol Ruby. *Acta Hortic.*, 320, 113-118.

Kim Y.D. et Kim S.H., 1999. Phylogeny of *Weigela* and *Diervilla* (*Caprifoliaceae*) based on nuclear rDNA ITS sequences : biogeographic and taxonomic implications. *J. Plant Res.*, 112 (1107), 331-341.

Mc Namara S. et Pellett H., 1998. Cold hardiness of *Weigela* cultivars. *J. Environ. Hortic.*, 16 (4), 238-242.

Svejda F., 1988. *Weigela* cultivars Tango and Polka. *Hortscience*, 23 (4), 787-788.

Conclusion

L'amélioration des espèces végétales cultivées a commencé depuis leur domestication. Basée sur les choix successifs des individus reproducteurs et sur la multiplication des entités sélectionnées, cette amélioration génétique a largement contribué aux progrès de l'agriculture. Qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs, ces progrès se cumulent aux autres améliorations associées notamment aux pratiques culturales. Des solutions génétiques peuvent également parfois être apportées à la pénibilité de certains travaux, comme le démariage des plants de betterave ou la récolte de fruits. Quelle que soit l'espèce, son amélioration est bien partie intégrante de la gestion de sa production et de son utilisation.

L'amélioration génétique d'une espèce cultivée est un processus continu qui utilise, à un instant donné, l'état des connaissances en biologie, en génétique, en physiologie sur cette espèce. La mise en œuvre de l'amélioration nécessite aussi la définition précise d'objectifs et de critères de sélection ainsi que la mise au point de méthodes de mesures des caractères sélectionnés, précises et applicables en grand nombre.

Une autre caractéristique de l'amélioration des plantes est qu'au-delà des méthodologies générales, dont les grands traits ont été déclinés dans la première partie, chaque espèce est un cas particulier en ce sens que les procédés utilisés pour son amélioration génétique sont la résultante de diverses contraintes liées à la biologie de l'espèce, les techniques qui lui sont applicables et les moyens qu'il est possible de consentir.

La biologie de l'espèce intervient au travers du cycle, de sa durée, des possibilités de le raccourcir pour augmenter le gain génétique par unité de temps, mais c'est principalement la biologie de la reproduction qui va guider le choix du type variétal à créer. Il est alors normal que, de longue date, l'améliorateur se soit attaché à contrôler ou à modifier le mode de reproduction pour permettre à la fois l'obtention de structures génétiques les mieux adaptées à l'expression des potentialités de l'espèce et à la production de semences fidèles au type variétal adopté. C'est dans ce cadre que se placent les travaux sur la stérilité mâle, la compétition pollinique, le greffage, la multiplication *in vitro*.

La biologie de l'espèce conditionne également le schéma de sélection qui est appliqué, sélection généalogique chez les autogames, sélection récurrente et tests des valeurs en combinaison chez les allogames. On conçoit qu'ici aussi le mode de reproduction et le pouvoir de multiplication conditionnent fortement les schémas possibles. Par exemple, un schéma de sélection et de production adapté au palmier à huile, dont une inflorescence porte des milliers de fruits, devient inopérant chez le cocotier qui produit un nombre limité de graines par an.

Ces contraintes biologiques ont donc conduit les améliorateurs à imaginer et à créer une grande diversité de méthodes de sélection, constamment alimentées par les progrès scientifiques dans des disciplines aussi variées que la génétique formelle, la statistique, la génétique quantitative, l'agronomie, la physiologie.

En regard de la diversité des méthodes, il faut aussi faire face à la diversité des questions posées. Améliorer la production est un objectif prioritaire lorsqu'il s'agit d'assurer la suffisance alimentaire ; mais, améliorer c'est aussi apporter la tolérance à une grande diversité de bio-agresseurs : insectes, champignons et virus, faciliter la tolérance à des contraintes de sols et de climats, réduire la durée du cycle de la graine à la graine pour échapper à la sécheresse, repousser la montée à graines chez les graminées pour conserver une bonne valeur nutritionnelle des fourrages, changer la composition d'une huile pour lui conférer une meilleure qualité alimentaire, conférer une bonne valeur boulangère à un blé, etc. Pour répondre à ces objectifs qui mettent en jeu des mécanismes souvent multiples et complexes, l'améliorateur fait appel à des méthodes qui, jour après jour, ont été élaborées à partir du progrès des connaissances et des techniques depuis près de deux siècles.

Aujourd'hui, la biologie moléculaire permet d'appréhender les mécanismes intimes de l'expression des caractères et, par conséquent, d'agir sur eux de façon plus précise. Jusqu'à présent, la biologie moléculaire permet, dans des situations encore simples, d'explicitier l'expression phénotypique d'un caractère sur la base de l'expression des gènes qui le conditionnent. À l'avenir, elle apportera un appui pour des caractères plus complexes et progressivement, la génétique quantitative, qui aurait pu être appelée génétique prédictive, trouvera les bases de sa prédiction dans l'expression moléculaire de gènes identifiés.

La méthode de sélection par rétrocroisements répétés a été utilisée dans de nombreuses espèces pour transférer dans une variété un caractère spécifique monogénique, parfois issu d'une autre espèce, mais dont on ne connaît pas la base moléculaire. En continuité et sans doute plus précise au plan de l'introduction génétique, la transgénèse permet maintenant d'introduire et de faire exprimer dans une espèce cultivée un gène identifié et qui s'exprime. La grande différence est, sans doute, la totale indépendance par rapport aux frontières d'espèces que ne confère pas la méthode du rétrocroisement, même assistée par des méthodes *in vitro* de sauvetage d'embryons, par exemple.

Un point fondamental, sans aucun doute, en amélioration des plantes, est la diversité génétique, source de changements possibles, source de nouveautés qui permet de répondre à l'évolution des objectifs à laquelle l'améliorateur est en permanence confronté.

La mobilisation en faveur de la conservation des ressources génétiques des espèces exploitées hier ou aujourd'hui, doit être forte et permanente car ces ressources fourniront, au travers de l'amélioration, les productions adaptées aux souhaits et aux besoins des utilisateurs. Utiliser cette diversité revient à la valoriser, tout en gardant la possibilité de la maintenir.

Le développement durable est une préoccupation majeure pour l'agriculture et l'environnement. L'amélioration génétique, discipline de synthèse, y contribue par une évolution des objectifs de sélection en faveur d'une résistance accrue à des contraintes biotiques et abiotiques et par une intégration de plus en plus forte des connaissances issues de l'agronomie. Ici encore, les ressources génétiques sont une source précieuse pour construire l'avenir.

Glossaire

Allèle. L'une des différentes formes d'un gène occupant un site défini ou locus sur un chromosome.

Apogamie. Développement d'un embryon sans fécondation. La graine a exactement le même génotype que la plante mère et la descendance constitue donc un clone.

Apomixie (adj : apomictique). Mode de reproduction par apogamie.

Appertisation. Procédé de conservation par stérilisation à la chaleur dans des récipients hermétiquement clos.

Appétence. Stimulation à satisfaire la faim, désir de nourriture. L'appétence est une notion relative à l'animal.

Appétibilité. Ensemble des caractéristiques physiques ou chimiques qui agissent sur l'appétence de l'animal. L'appétibilité est une notion relative au fourrage ou plus généralement aux produits consommés par un animal.

Athérome. Dégénérescence graisseuse de la tunique interne des artères.

Autofertilité. Aptitude d'un individu végétal hermaphrodite ou monoïque, à se reproduire par autofécondation.

Auto-incompatibilité. Impossibilité pour le pollen de germer sur le stigmate ou de féconder l'ovule d'une fleur d'un même individu.

Bio-agresseur. Organisme vivant altérant l'état sanitaire d'une plante.

Biolistique. Technique de transformation génétique des cellules eucaryotiques basées sur le bombardement de celles-ci par de minuscules particules de tungstène recouvertes d'ADN.

Branchaison. Façon dont un rameau s'insère sur une branche (ou une branche sur un tronc).

Certification des semences. La certification atteste que les semences ont été produites dans les conditions et les procédures exigées par la réglementation en vigueur. Elle vise à mettre à la disposition des agriculteurs des semences caractérisées par la qualité physique et physiologique (pureté spécifique, faculté germinative et état sanitaire) et par l'identité et la pureté variétale.

Cléistogamie. Fécondation naturelle de la fleur avant son ouverture ou avant l'émergence des organes de reproduction.

Consanguinité (*Inbreeding*). Conséquence du croisement entre individus apparentés.

Core collection (anglicisme) **collection-noyau** : échantillon d'une collection représentant la diversité des génotypes sur le plan génétique (et agroécologique), afin d'en faciliter l'accès et l'utilisation par les améliorateurs et les physiologistes.

- Costière / cùtière.** Bande de terre abritée par un mur exposé au sud et inclinée en direction du soleil.
- Coulure.** Chute des fleurs ou des jeunes fruits suite à des conditions climatiques défavorables ou/et à des désordres génétiques et métaboliques.
- Croisement diallèle.** Plan de croisement qui consiste à faire tous les croisements 2 à 2 de n parents, avec ou sans les autofécondations.
- Croissance déterminée ou indéterminée.** La croissance végétative est déterminée si le bourgeon terminal se transforme en inflorescence. Elle est indéterminée quand elle se poursuit si le bourgeon terminal reste végétatif.
- Cryoconservation.** Technique de conservation à très basse température (stockage dans l'azote liquide, -196°C) de cellules, tissus ou organes.
- CTPS.** Comité technique permanent de la sélection des plantes cultivées : c'est une assemblée consultative du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales divisée en sections relatives aux espèces.
- Cultigroupe.** Groupe de variétés cultivées ou cultivars, à l'intérieur d'une espèce, présentant des similarités importantes, notamment en terme de développement de la plante ou du mode de culture. Ce terme est surtout utilisé dans le cas des espèces potagères.
- Cultivar (anglicisme) (cf. Variété cultivée)** Contraction de *cultivated variety* (cv.), synonyme de variété cultivée agricole ou horticole.
- Démariage.** Travail d'éclaircissage qui consiste à enlever les jeunes plantules en surnombre résultant du développement des semences multigermes chez la betterave.
- DHS.** Distinction, homogénéité, stabilité : ensemble de critères étudiés pour établir la carte d'identité d'une nouvelle variété dans le cadre de l'inscription au catalogue officiel des espèces et variétés ou de la protection des obtentions végétales.
- Digestibilité.** Aptitude d'un aliment à être transformé en molécules organiques (glucides, lipides, protéines, ...) sous l'action des enzymes digestives dans le tube digestif sans préjuger de l'absorption intestinale ultérieure.
- Diplogamète.** Cellule reproductrice, mâle ou femelle ayant le même nombre de chromosomes que le sporophyte.
- Duplicature.** Augmentation du nombre des pièces du périanthe au détriment des pièces fertiles.
- Éclaircissage.** Action de supprimer des plants d'un semis, des fruits d'un arbre, pour favoriser la croissance des autres.
- Écotype.** Ensemble des individus d'une même espèce occupant un même biotope et dont l'adaptation résulte de la sélection par ce milieu.
- Enrubannage.** Opération consistant à enrouler des rubans de matière plastique adhésive et étanche autour des balles de foin.
- Ensilage.** Méthode de conservation des produits végétaux consistant à les placer dans des silos pour contrôler la fermentation.
- Fardeau génétique.** Ensemble des gènes défavorables (déterminant des tares héréditaires) qui existent dans une population.
- Fasciation.** Anomalie d'une plante chez laquelle certains organes s'aplatissent au lieu de conserver leur forme cylindrique, ressemblant à la fusion de plusieurs d'entre eux.
- Favisme.** Anémie hémolytique observée chez certaines personnes lors de l'absorption de fèves.

Flux de gènes. Transfert spontané de gènes d'un groupe de plantes vers un autre par la reproduction sexuée.

Gemmage. Récolte de la résine du pin maritime après incision de l'écorce jusqu'aux tissus vivants.

Gène. Élément génétique défini comme une unité de fonction, de mutation ou de recombinaison. C'est une séquence d'ADN constituant une unité d'information génétique. Le terme de gène, introduit par W. Johanssen (1908), est parfois employé dans le sens de « locus » (par exemple, des gènes liés ou bien des gènes indépendants) et parfois dans le sens « d'allèle » (par exemple, un gène de couleur ou de résistance aux maladies).

Gene silencing (anglicisme) ou non-expression d'un gène. Extinction de l'expression d'un gène grâce à l'action de petits ARN interférents liés à un complexe protéique qui, au niveau post-transcriptionnel, dégradent l'ARN messager ou au niveau transcriptionnel, interfèrent avec les histones et la méthylation de l'ADN.

Goût foxé. Désigne l'odeur, entre celle du renard et celle de la punaise, que dégage le vin produit à partir de certains cépages hybrides.

Grume. Tronc d'arbre abattu, ébranché et recouvert de son écorce.

Haploïdie. État d'un génome réduit au nombre gamétique de chromosomes.

Hétérosis (nom féminin). Supériorité phénotypique du produit du croisement par rapport aux parents (meilleur parent); peut se définir au niveau d'un croisement ou d'une population.

Idéotype. Ensemble des caractéristiques idéales d'une plante ou d'un animal établies selon les objectifs de sélection à atteindre et les impératifs techniques et économiques de la culture ou de l'élevage considéré.

Houppier. Ensemble de la partie feuillue d'un arbre.

Inbred ou Consanguin. cf. consanguinité.

Ingestibilité. Quantité d'un aliment ingérée par un animal (en g de matière sèche par kg de poids vif de l'animal par unité de temps) lorsque l'aliment est distribué seul et à volonté.

Introgression. Processus par lequel du matériel génétique est transféré d'une espèce ou d'un complexe d'espèces dans un autre par le biais de l'hybridation.

Isogénique. Se dit d'individus ayant le même stock chromosomique à un ou quelques gènes près.

Laticifère. Cellule allongée, ou file de cellules, existant dans les tissus de certaines espèces et contenant du latex.

Liste A – plantes de grande culture. Dans le catalogue officiel, liste des variétés ayant subi avec succès en France les épreuves de distinction, homogénéité, stabilité (DHS), ainsi que les tests de valeur agronomique et technologique (VAT), dont les semences peuvent être commercialisées sur le territoire de l'Union européenne.

Liste B – plantes de grande culture. Dans le catalogue officiel, liste des variétés ayant subi avec succès en France les épreuves de distinction, homogénéité, stabilité (DHS), dont les semences sont destinées à l'export hors de l'Union européenne.

Liste a – espèces potagères. Dans le catalogue officiel, liste des variétés dont les semences peuvent être certifiées en tant que semences de base ou semences certifiées ou en tant que semences standard.

Liste b – espèces potagères. Dans le catalogue officiel, liste des variétés dont les semences ne peuvent être contrôlées qu'en tant que semences standard.

Locus (pl. locus). Position sur un chromosome.

Longévité. Se dit d'une espèce qui vit très longtemps, au moins 100 ans.

Maintenance. cf. sélection conservatrice.

Méthode *bulk* ou sélection en mélange ou sélection généalogique différée. Pour les plantes autogames : multiplication en mélange par autofécondations successives, à partir d'une F₂. En sylviculture : multiplication végétative d'un mélange de génotypes.

Microgreffage. Technique de greffage pratiquée *in vitro* où le greffon est un méristème.

Montaison. Élongation de la tige d'une plante à entre-nœuds courts, en rosette, en prélude à la floraison.

Nucléotide. Ester phosphorique d'un nucléoside, l'estérification affectant le sucre.

Panmixie. Reproduction au hasard des individus d'une population (rencontre au hasard des gamètes).

Phase climatérique (*climacteric* en anglais). Crise respiratoire au cours de laquelle la respiration d'un fruit est modifiée à la suite d'une forte synthèse autocatalytique d'éthylène.

Phénologie. Partie de l'écologie consacrée à l'étude de l'influence des variations climatiques saisonnières sur le développement des organismes.

Phylogénie. Histoire de l'évolution d'une espèce ou d'une autre catégorie taxonomique.

Phylum. Groupement de classifications des êtres vivants ou fossiles.

Pincement. Suppression manuelle de jeunes bourgeons.

Pomaison. Changement de la morphogenèse d'une plante en rosette, consistant en un raccourcissement progressif des feuilles et leur incurvation vers l'axe de la rosette.

Produit de 4^e gamme. Produit végétal frais, vivant, ayant subi un traitement de préparation, lavé, emballé, prêt à être consommé.

Produit de 5^e gamme. Produit végétal précuit à des températures permettant sa pasteurisation ou leur stérilisation, puis conditionné sous vide dans un emballage en matière plastique (mais il peut aussi être cuit sous vide dans son emballage).

Progéniteur. Ancêtre commun à plusieurs individus.

Propriété rhéologique. Caractéristiques de l'élasticité, plasticité, viscosité d'un matériau.

Protandrie. Situation dans laquelle la floraison mâle a lieu avant la floraison femelle.

Regarnissage. Capacité des plantules à coloniser rapidement les espaces de sol nu.

Remontaison. Capacité de la plante à former de nouvelles talles reproductrices après une exploitation ayant éliminé tous les apex reproducteurs.

Résistance dite horizontale : résistance partielle, incomplète, causée par l'effet conjoint de quelques gènes.

Résistance dite verticale : résistance totale causée par l'effet d'un gène.

Rétrocroisement ou *backcross*. Croisement d'un individu hybride par un de ses parents.

Rétrotransposon. Chez les eucaryotes, élément du génome transcrit en ARN, codant une activité transcriptase inverse qui produit des copies d'ADN de l'élément, capables de s'intégrer (transposition) à nouveau dans le génome.

Rouissage. Opération de nature microbienne ayant pour but d'éliminer le ciment pectique enrobant les fibres celluloses des écorces des plantes textiles, chanvre, lin, jute, etc., et d'isoler celles-là en vue d'obtenir la filasse.

Scion. Jeune plant greffé.

Sélection conservatrice. Ou maintenance : action qui consiste à reproduire et à conserver un échantillon représentatif de la variété conforme au lot d'origine pour l'ensemble des caractères descriptifs utilisés pour établir la distinction au sein de l'espèce.

Sélection sanitaire. Sélection de matériel végétal sain, dépourvu de microorganismes responsables de maladies, en particulier au cours de la production de semences.

Semence certifiée et semence standard. Une semence certifiée est contrôlée depuis sa production jusqu'à son emballage, et le SOC peut certifier à l'acheteur son niveau d'identité et de pureté variétale. Une semence standard est contrôlée *a posteriori*, une fois sa « fabrication » terminée. Il s'agit d'un contrôle de qualité effectué par l'établissement multiplicateur.

Semence récalcitrante. Semence apte à la germination en l'absence d'eau complémentaire, ne tolérant pas ou peu la déshydratation et très sensible aux variations de température.

Spontané. Se dit d'une espèce végétale acclimatée à un milieu dont elle n'est pas originaire, mais où elle se reproduit spontanément et s'intègre à la flore locale.

Superdominance. À un locus donné, supériorité de l'hétérozygote par rapport aux deux homozygotes correspondants.

Synténie. Conservation de l'ordre des gènes sur les chromosomes chez différentes espèces.

Tête d'assolement. Première espèce végétale cultivée sur une parcelle pour nettoyer un sol.

Thermothérapie. Emploi de la chaleur pour assainir un plant.

Translocation. Remaniement chromosomique au cours duquel un segment chromosomique change de place.

Transmission d'un virus sur le mode non persistant. Caractérisation de la transmission d'un virus par un insecte vecteur. Dans ce cas, le vecteur (cicadelle, puceron,...), après avoir acquis le virus, reste virulifère uniquement durant quelques heures, voire quelques minutes.

Trisomie. Présence d'un chromosome en trois exemplaires (au lieu de deux) homologues dans les cellules d'un individu.

Trituration. Ensemble des opérations de pression et d'extraction des graines fournissant de l'huile et du tourteau.

Variation somaclonale. Variation parfois observée sur des plantes issues de culture *in vitro* de cellules ou de tissus.

Variété botanique (*varietas*, *var.*). Taxon intraspécifique désignant des plantes caractérisées par un petit nombre de traits communs.

Variété cultivée ou variété horticole, agricole. Variété de plante cultivée obtenue par sélection.

Variété synthétique. Population résultant de la multiplication pendant un nombre déterminé de générations de la descendance de croisements entre un certain nombre de constituants (classes, lignées, familles, etc.) sélectionnés pour leur valeur propre ou leur valeur en combinaison.

VAT. Valeur agronomique et technologique : ensemble de critères étudiés dans le cadre de l'inscription au catalogue officiel permettant d'évaluer la valeur d'utilisation d'une nouvelle variété (rendement, qualité, résistances aux maladies, etc.).

Vergers à graines. Plantation de clones ou de descendances sélectionnées d'arbres forestiers, suffisamment isolée ou spécialement gérée pour que les pollinisations exogènes soient inexistantes ou faibles, conduite pour obtenir une production de graines fréquente, abondante et de récolte aisée.

Vitro-plant. Plante issue de culture *in vitro*.

Abréviations, acronymes et sigles

Abréviations

AAM	ADN-adénineméthylase
ACC	acide carboxylique-1-aminocyclopropane
ACCD	acide carboxylique-1-aminocyclopropane désaminase
ADN	acide désoxyribonucléique (DNA : <i>desoxyribonucleic acid</i>)
ADNc	ADN complémentaire (cDNA)
ADP	adénosine diphosphate
AFLP	<i>Amplification fragment length polymorphism</i> (polymorphisme de longueur des fragments d'amplification)
AGC	aptitude générale à la combinaison
AGM	Arbre génétiquement modifié
AGPase	ADP-glucose pyrophosphorylase
ALV	<i>Artichoke latent virus</i> (virus latent de l'artichaut)
AO-VDQS	Appellation d'origine-Vin délimité de qualité supérieure
AOC	Appellation d'origine contrôlée
APV	Autorisation provisoire de vente
ARN	acide ribonucléique
ARNm	acide ribonucléique messenger
ASC	aptitude spécifique à la combinaison
BAC	<i>Bacterial artificial chromosome</i> (chromosome bactérien artificiel)
BaMMV	<i>Barley mild mosaic virus</i> (VMMO : virus de la mosaïque modérée de l'orge)
BaYMV	<i>Barley yellow mosaic virus</i> (VMJO : virus de la mosaïque jaune de l'orge)
bv.	biovar : variant biochimique d'une espèce ou sous-espèce microbienne
BBTV	<i>Banana bunchy top virus</i> (virus des feuilles en bouquet du bananier)
BBWV	<i>Broadbean wilt virus</i> (virus du flétrissement de la fève)
BLO	<i>Bacteria like organism</i>
BNYVV	<i>Beet necrotic yellow vein virus</i> (virus des nervures jaunes de la betterave)
BSV	<i>Banana streak virus</i> (virus de la mosaïque en tirets du bananier)
BWYV	<i>Beet western yellow virus</i> (virus de la jaunisse occidentale de la betterave)

BYDV	<i>Barley yellow dwarf virus</i> (virus de la jaunisse nanisante de l'orge : VJNO)
BYMV	<i>Bean yellow mosaic virus</i> (virus de la mosaïque jaune du haricot)
CABYV	<i>Cucurbit aphid-borne yellows virus</i> (virus de la jaunisse des Cucurbitacées transmise par puceron)
CAD	cinnamylalcool déshydrogénase
CaMV	<i>Cauliflower mosaic virus</i> (virus de la mosaïque du chou-fleur)
CBD	<i>Coffee berry disease</i> (anthracnose des baies du caféier)
cDNA	<i>complementary DNA</i> (ADNc)
ChiVMV	<i>Chilli vein mottle virus</i> (virus de la marbrure des nervures du piment)
CMV	<i>Cucumber mosaic virus</i> (virus de la mosaïque du concombre)
CLRV	<i>Cherry leafroll virus</i> (virus de l'enroulement foliaire du cerisier)
COV	Certification d'obtention végétale
CVYV	<i>Cucumber vein yellowing virus</i> (virus du jaunissement des nervures du concombre)
CYSDV	<i>Cucurbit yellow stunting disorder virus</i> (virus du nanisme jaunissant des Cucurbitacées)
DHS	Distinction, homogénéité, stabilité
DON	déoxynivalénol
ECA	Enroulement chlorotique de l'abricotier
ELISA	<i>Enzyme-linked immunosorbent assay</i> (dosage immunoenzymatique des anticorps)
EPSPS	5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthétase
ESB	Encéphalite spongiforme bovine
EST	<i>Expressed sequence tags</i> (étiquettes de séquences transcrites)
ETBE	éthyl-tertio-butyl-ester
FEH	<i>Fructan exohydrolase</i>
FFT	Fructan-fructan fructosyl transférase
f. p.	<i>forma perfecta</i> (forme parfaite d'un champignon)
f. sp.	<i>forma specialis</i> (taxon d'un rang hiérarchique inférieur à la sous-espèce, vivant en parasite, en commensal ou en symbiose avec un hôte, et caractérisé par son adaptation à cet hôte.
GAD 65	<i>Glutamic acid decarboxylase</i> (acide glutamique décarboxylase)
GFLV	<i>Grapevine fanleaf virus</i> (virus du court-noué de la vigne)
GIE	Groupeement d'intérêt économique
GLRaV	<i>Grapevine leafroll associated virus</i> (virus de l'enroulement de la vigne)
GUS	β -glucuronidase
HPD	hybrides producteurs directs
HPLC	<i>High performance liquid chromatography</i> (chromatographie liquide à haute performance)
IR	Indice réfractométrique

ISSR	<i>Inter simple sequence repeats</i> (amplification microsatellite)
J.-C.	Jésus-Christ
LBVV	<i>Lettuce big vein virus</i> (virus des grosses nervures de la laitue)
LMV	<i>Lettuce mosaic virus</i> (virus de la mosaïque de la laitue)
MAT	Matières azotées totales
MFR	Matériels forestiers de reproduction
MNSV	<i>Muskmelon necrotic spot virus</i> (virus de la criblure du melon)
MS	Mâle stérile
MS	Matière sèche
MSE	méthylsulfonate d'éthyle
NIRS	<i>Near infrared spectrometry</i> (SPIR)
OGM	Organisme génétiquement modifié
OYDV	<i>Onion yellow dwarf virus</i> (virus de la bigarrure de l'oignon)
PAC	Politique agricole commune
PAT	phosphinothricine-N-acétyltransférase
PCMV	<i>Pea common mosaic virus</i> (virus de la mosaïque commune du pois)
PCR	<i>Polymerase chain reaction</i> (réaction de polymérisation en chaîne)
PLMVd	<i>Peach latent mosaic viroid</i> (viroïde latent de la mosaïque du pêcher)
PLRV	<i>Potato leafroll virus</i> (virus de l'enroulement foliaire de la pomme de terre)
PMMV	<i>Pepper mild mottle virus</i> (virus de la mosaïque du piment)
PPR	motif de répétition pentatricopeptidique d'une protéine
PPV	<i>Plum pox virus</i> (virus de la variole des <i>Prunus</i>)
PRSV-W	<i>Papaya ringspot virus watermelon strain</i> : virus des taches annulaires du papayer (anciennement WMV1 : <i>watermelon mosaic virus</i> 1 ou virus 1 de la mosaïque de la pastèque)
PSBV	<i>Pea seed-borne mosaic virus</i> (virus de la mosaïque du pois transmise par la graine)
pv.	pathovar : variété (au sens de variété botanique) d'agent pathogène. Subdivision intraspécifique regroupant des individus possédant des caractères phénotypiques identiques ou très proches, mais qui expriment un pouvoir pathogène distinct, de façon reproductible, sur un ou plusieurs hôtes.
PVA	<i>Potato virus A</i> (virus A de la pomme de terre)
PVM	<i>Potato virus M</i> (virus M de la pomme de terre)
PVMV	<i>Pepper veinal mottle virus</i> (virus de la marbrure des nervures du piment)
PVS	<i>Potato virus S</i> (virus S de la pomme de terre)
PVX	<i>Potato virus X</i> (virus X de la pomme de terre)
PVY	<i>Potato virus Y</i> (virus Y de la pomme de terre)
QTL	<i>Quantitative trait loci</i> (locus à effet quantitatif)
RAPD	<i>Random-amplified polymorphic DNA</i> (ADN polymorphe amplifié au hasard)
RF	Restaurateur de fertilité

RFLP	<i>Restriction fragment length polymorphism</i> (polymorphisme de longueur de fragments de restriction)
RGMV	<i>Rye-grass mosaic virus</i> (virus de la mosaïque du ray-grass)
RMN	Résonance magnétique nucléaire
SAGE	<i>Serial analysis of genome expression</i> (analyse systématique des séquences exprimées)
SALB	<i>South american leaf blight</i> (maladie sud-américaine des feuilles d'hévéa)
SAM	Sélection assistée par marqueurs
SAMase	S-adénosyl méthionine hydrolase
SARL	Société à responsabilité limitée
SAS	Société par action simplifiée
SM/POL	rapport sucre mélasse/sucre total (mesuré par polarimétrie)
SNP	<i>Single nucleotid polymorphism</i> (polymorphisme mononucléotidique)
sp.	<i>species</i> : espèce. Ce terme s'emploie après un nom de genre pour désigner une espèce indéterminée dans ce genre.
SPIR	Spectrométrie dans le proche infrarouge (NIRS)
spp.	<i>species plures</i> : plusieurs espèces. Ce terme s'emploie après un nom de genre pour désigner un ensemble de plusieurs espèces indéterminées, ou que l'on ne souhaite pas énumérer.
SqMV	<i>Squash mosaic virus</i> (virus de la mosaïque de la courge)
SSD	<i>Single seed descent</i> (sélection par filiation monograine)
ssp. subsp.	<i>subspecies</i> : sous-espèce
SSR	<i>Simple sequence repeats</i> (répétition de séquences simples ou microsatellites)
SST	<i>Sucrose-sucrose fructosyltransferase</i>
s-u Glu-HPM	sous-unités gluténines de haut poids moléculaire
syn.	synonyme
TBV	<i>Tulip breaking virus</i> (virus de la panachure de la tulipe)
TE	thioestérase
TILLING	<i>Targeting induced local lesion in genome</i> (ciblage de lésions induites)
TMV	<i>Tobacco mosaic virus</i> (virus de la mosaïque du tabac)
TSWV	<i>Tomato spotted wilt virus</i> (virus de la maladie bronzée de la tomate)
Tu-MV	<i>Turnip mosaic virus</i> (virus de la mosaïque du navet)
TYLCV	<i>Tomato yellow leaf-curl virus</i> (virus de l'enroulement foliaire de la tomate)
UF	unité fourragère : 1 UF correspond à la métabolisation d'1 kg de grain d'orge
UFL	unité fourragère pour la production de lait
IU	<i>inhibitor unit</i> : unité d'inhibiteur ; 1 IU inhibe 1 U de trypsine définie par le clivage d'1 μ mole de BAEE (N-benzoyl-L-arginine ethyl ester) par minute.
UTI	<i>Units (of) trypsinic inhibitors</i> (unité d'inhibiteurs tryptiques)
var.	<i>varietas</i> : variété botanique
VAT	Valeur agronomique et technologique

VDQS	Vin délimité de qualité supérieure
VMB	virus de la mosaïque du blé (<i>Yellow mosaic virus</i> : YMV)
VQPRD	Vins de qualité produits dans des régions déterminées
VSFB	virus de la mosaïque des stries en fuseau du blé (<i>Wheat streak mosaic virus</i> : WSMV)
VUP	Viscosité utile potentielle
VUR	Viscosité utile réelle
VJNO	virus de la jaunisse nanisante de l'orge (<i>Barley yellow dwarf virus</i> : BYDV)
VMJO	virus de la mosaïque jaune de l'orge (BaYMV : <i>Barley yellow mosaic virus</i>)
VMMO	virus de la mosaïque modérée de l'orge (BaMMV : <i>Barley mild mosaic virus</i>)
WMV	<i>Watermelon mosaic virus</i> (virus de la mosaïque de la pastèque (anciennement WMV2))
WMV2	<i>Watermelon mosaic virus 2</i> (virus 2 de la mosaïque de la pastèque)
WSMV	<i>Wheat streak mosaic virus</i> (virus de la mosaïque des stries en fuseau du blé : VSFB)
YMV	<i>Yellow mosaic virus</i> (virus de la mosaïque jaune du blé : VMB)
ZYMV	<i>Zucchini yellow mosaic virus</i> (virus de la mosaïque jaune de la courgette)

Acronymes et sigles*

AAC	Agriculture et agroalimentaire Canada, Canada
ACVF	Association des créateurs de variétés fourragères
ACVPF	Association des créateurs de variétés potagères et florales
AFOCEL	Association forêt-cellulose
AMSOL	Association des industries des semences de plantes oléoprotéagineuses (anciennement Association des multiplicateurs de semences oléagineuses)
ANMF	Association nationale de la meunerie française
ANPN	Association nationale des producteurs de noisettes
ANPPF	Association nationale des producteurs de petits fruits
APREL	Association provençale de recherche et d'expérimentation légumières
APRIFEL	Agence pour la recherche et l'information en fruits et légumes frais
ARC	<i>Agricultural Research Council</i> , Afrique du Sud
AREFLEC	Association régionale d'expérimentation des fruits et légumes de Corse
ARS	<i>Agricultural Research Service</i> , États-Unis
AVRDC	<i>Asian Vegetable Research and Development Center</i> , Taiwan
BRG	Bureau des ressources génétiques
BTI	<i>Boyce Thompson Institute for Plant Research</i> , États-Unis
CAAS	<i>Chinese Academy of Agricultural Sciences</i> , Chine

* Le nom du pays est précisé, lorsqu'il ne s'agit pas de la France.

CARBAP	Centre africain de recherches sur bananiers et plantains, Cameroun
CATIE	<i>Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Ensenanza</i> , Costa Rica
CEE	Communauté économique européenne, Bruxelles, Belgique
CELFNORD	Comité économique des fruits et légumes de la région Nord
CEMAGREF	Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et forêts
CEP	Centre d'expérimentation des pépinières
CETIOM	Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitains
CPFA	Centre de la productivité forestière d'Aquitaine
CGBM	Commission du génie biomoléculaire
CGB	Confédération générale des planteurs de betteraves
CGN	<i>Centre for Genetic Resources</i> , Wageningen, Pays-Bas
CIAT	<i>Centro Internacional de Agricultura Tropical</i> , Cali, Colombie
CIMMYT	<i>Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo</i> , El Baton, Mexique
CIP	Centro internacional de la papa, Lima, Pérou
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CIREF	Centre interrégional de recherche et d'expérimentation de la fraise
CNERNA	Centre national d'études et de recherches sur la nutrition et l'alimentation
CNRA	Centre national de la recherche agronomique, Côte-d'Ivoire
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CPB	Comité provisoire de biovigilance
CPOV	Comité de la protection des obtentions végétales
CRB	Centre de ressources biologiques
CRG	Centre de ressources génétiques
CRPF	Centre régional de la propriété forestière
CRVA	Centre de ressources végétales d'Aquitaine
CSIC CEBAS	<i>Consejo Superior de Investigaciones Agrarias Centro de Edafologia y Biologia Aplicada del Segura</i> , Espagne
Ctifl	Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
CTPS	Comité technique permanent pour la sélection des plantes cultivées
DGAP	Département de génétique et d'amélioration des plantes de l'INRA
DGFAR	Direction générale de la forêt et des affaires rurales (elle remplace depuis 2003 la DERF)
DERF	Direction de l'espace rural et de la forêt
DOM-TOM	Départements d'outre-mer et territoires d'outre-mer
DRAF	Direction régionale de l'agriculture et de la forêt
ECP/GR	European Cooperative Programme for Crop Genetic Resources Networks
EMBRAPA-	<i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de</i>
CNPMF	<i>Mandioca e Fruticultura Tropical</i> , Brésil
ENSAM	École nationale supérieure agronomique de Montpellier (maintenant Agro M)

ENTAV	Établissement national technique pour l'amélioration de la viticulture
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> , Italie
FHIA	<i>Fundaciòn Hondureña de Investigación Agrícola</i> , Honduras
FNPE	Fédération nationale des producteurs d'endive
FNPF	Fédération nationale des producteurs de fruits
GEVES	Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences
GKI	<i>Gabonatermesztesi Kutató Intézet</i> , Hongrie
GNIS	Groupement national interprofessionnel des semences
GRIN	<i>Germplasm Resources Information Network</i> , États-Unis
HFRI	<i>Horticulture and Food Research Institute of New Zealand</i> , Nouvelle-Zélande
HGCA	<i>Home Grown Cereal Authority</i> , Royaume-Uni
HRI	<i>Horticultural Research Institute</i> , Royaume-Uni
IAC	<i>Instituto Agrícola do Campinas</i> , Brésil
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> , Autriche
IAN	<i>Instituto Agrícola do Norte</i> , Brésil
IBEB	<i>International Bremia Evaluation Board</i> , Europe
ICARDA	<i>International Center for Agricultural Research in the Dry Areas</i> , Alep, Syrie
ICRA	<i>International Cultivar Registration Authorities</i> , Royaume-Uni
IDF	Institut pour le développement forestier
IFCC	Institut français du café et du cacao
IFN	Inventaire forestier national
IHAR	<i>Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin (Plant Breeding and Acclimatization Institute)</i> , Poznań, Pologne
IIRB	Institut international de recherches betteravières, Bruxelles, Belgique
IITA	<i>International Institute of Tropical Agriculture</i> , Nigeria
INAO	Institut national des appellations d'origine
INH	Institut national d'horticulture
INIA	<i>Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria</i> , Espagne
INIBAP	<i>International Network for the Improvement of Banana and Plantain</i> , France
INRA	Institut national de la recherche agronomique
IPGRI	<i>International Plant Genetic Resources Institute</i> (anciennement IBPGR), Italie
IPK	<i>Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung</i> , Allemagne
IRCA	Institut de recherches sur le caoutchouc en Afrique
IRD	Institut de recherche pour le développement (anciennement ORSTOM)
IRRDB	<i>International Rubber Research and Development Board</i> , Kuala Lumpur, Malaisie
IRSG	<i>International Rubber Study Group</i> (Groupe international d'études des pays producteurs de caoutchouc), Londres, Royaume-Uni
IRTA	<i>Instituto de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries</i> , Espagne
SCPP	<i>Statiunea de Cercetare si Productie Pomicola</i> , Roumanie

ISF	<i>Istituto Sperimentale per la Frutticoltura</i> , Italie
ISHS	<i>International Society for Horticultural Science</i> (ou SIHS : Société internationale pour la science horticole), Louvain, Belgique
ITB	Institut technique de la betterave
ITCF	Institut technique des céréales et fourrages
KAVB	<i>Koninklijke Algemeene Vereeniging voor Bloembollencultuur</i> (Association royale des producteurs de bulbes des Pays-Bas) Pays-Bas
NAGREF	<i>National AGricultural REsearch Fondation</i> , Grèce
NGB	<i>Nordic Gene Bank</i> , Suède
NIAR	<i>National Institute of Agrobiological Resources</i> , Japon
NPGS	<i>National Plant Germplasm System</i> , États-Unis
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OCVV	Office communautaire des variétés végétales
OIV	Organisation internationale de la vigne et du vin
ONF	Office national des forêts
ONIVINS	Office national interprofessionnel des vins
ORSTOM	Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (maintenant IRD)
PBAI	<i>Plant Breeding and Acclimatization Institute</i> , Radzikow, Pologne
PLM	Paris-Lyon-Méditerranée
PRI	<i>Plant Research International</i> , Pays-Bas
RIVC	<i>Research Institute for Vegetable Crops</i> , Italie
RRIM	<i>Rubber Research Institute of Malaysia</i> , Malaisie
SCEES	Service central des études économiques et statistiques
SCRI	<i>Scottish Crop Research Institute</i> , Dundee, Royaume-Uni
SERFOB	Service forêt bois de la direction régionale de l'agriculture et de la forêt (DRAF)
SICA	Société d'intérêt collectif agricole
SIHS	Société internationale pour la science horticole (ou ISHS : <i>International Society for Horticultural Science</i>), Louvain, Belgique
SNFS	Syndicat national des fabricants de sucre de France
SOC	Service officiel de contrôle
SCPP	<i>Statiunea de Cercetare si Productie Pomicola</i> , Baneasa, Roumanie
TGRC	<i>Tomato Genetics Resource Center</i> , États-Unis
UIRPM	Union des industries du rabotage du pin maritime
UNILET	Union nationale interprofessionnelle des légumes transformés
UNIP	Union nationale interprofessionnelle des protéagineux
UPOV	Union pour la protection des obtentions végétales
URSS	Union des républiques socialistes soviétiques
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> , États-Unis
VIR	<i>N.I. Vavilov Research Institute of Plant Industry</i> ou Institut Vavilov, Russie

Index des noms latins des plantes*

- Aegilops ovata* 138, 148
Aegilops speltoides 137
Aegilops squarrosa 137, 743
Aegilops tauschii 137, 148
Aegilops ventricosa 143, 144, 148, 743
Agropyron 138, 149
Allium cepa **481**
Allium fistulosum 481, 489, 490, 491
Allium roylei 490, 491
Allium vavilovii 481
Ammophila arenaria 557
Arabidopsis thaliana 266, 269, 272, 274, 516, 706
Arachis hypogea 678, 711
Asclepias curassavica 430
Asclepias syriaca 430
Asparagus maritimus 85, 90
Asparagus officinalis **85**
Asparagus prostratus 85, 90
Aukoumea klaineana 533
- Beta procumbens* 120, 124, 127
Beta vulgaris **115**, 116, 117
Brassica campestris 255
Brassica carinata 267, 274
Brassica cretica 230
Brassica juncea 256, 267, 274
Brassica napus 244, **255**
Brassica nigra 267
Brassica oleracea **229**, 230, 231, 232, 255
Brassica rapa 234, 244, 255, 267, 274
- Capsicum annuum* **543**
Capsicum baccatum 551
- Capsicum chacoense* 548, 550
Capsicum chinense 548, 549, 550, 551
Cassia fistula 199
Cichorium endivia 212, 213, 220
Cichorium intybus **207**, **219**, 220, 224, 548
Coffea × arabusta 169
Coffea arabica **163**
Coffea brevipes 173
Coffea canephora **163**
Coffea congestensis 168, 170, 172, 173
Coffea eugeniioides 163, 173
Coffea liberica 163, 172, 173
Coffea pseudozanguebariae 173
Corylus avellana **461**
Corylus chinensis 465
Corylus colurna 465
Corylus heterophylla 465
Corylus maxima 461
Corylus pontica 461
Cotoneaster 656
Crataegus 653
Crocus sativus 124
Cucumis ficifolius 444
Cucumis melo 435
Cydonia 581
Cydonia oblonga 575, 581, 656
Cynara cardunculus 71, 79
Cynara scolymus **71**
Cynodon dactylon 672
- Dactylis glomerata* **281**, 398
Dahlia 757
Daucus capillifolius 184, 191, 194
Daucus carota **183**, 191
Diervilla 783, 784

* citées dans la 2^e partie de l'ouvrage. Pour les espèces faisant l'objet d'un chapitre entier, seule la 1^{re} page de celui-ci est indiquée en caractères gras.

Elaeis guineensis 678

Eruca sativa 377

Festuca arundinacea **291**, 670

Festuca pratensis 291, 298, 675

× *Festulolium* 295, 296, 297, 298, 668, 670, 674, 675

Forsythia **313**, 316, 317

Forsythia europaea 313

Forsythia × *intermedia* 314

Forsythia mandshurica 315

Forsythia ovata 313, 314, 315

Forsythia suspensa 313, 314

Forsythia viridissima 313, 314

Fragaria × *ananassa* **319**

Fragaria chilensis 319, 320, 324, 327

Fragaria moschata 319, 320, 327

Fragaria vesca 319, 320, 323, 327

Fragaria × *vescana* 327

Fragaria virginiana 319, 320, 324, 327

Gladiolus 757

Glycine max 153, 301, 586, **677**

Glycine soja 677, 678, 683, 684, 687

Gossypium 678

Helianthus 711, 718

Helianthus annuus 223, **711**

Helianthus argophyllus 712, 719, 721

Helianthus petiolaris 712, 715, 718, 721

Helianthus tuberosus 712, 719, 721

Hevea benthamiana 349, 354, 355

Hevea brasiliensis **349**

Hevea pauciflora 349, 354, 355

Hevea spruceana 349

Hirschfeldia incana 270

Hordeum 497

Hordeum bulbosum 496, 507, 510

Hordeum vulgare **495**, 496, 497, 738

Humulus lupulus 495

Hydrangea 367

Hydrangea × *hortensiolaris* 362, 365

Hydrangea macrophylla **361**, 363, 366, 367

Hydrangea paniculata 362, 365, 366

Hydrangea petiolaris 362, 365, 366

Jasminum 313

Juglans hindsii 473

Juglans major 470, 473, 474

Juglans nigra 470, 473, 474

Juglans regia **469**, 470, 474

Lablab purpureus 338

Lactuca perennis 377

Lactuca saligna 369, 373, 374, 375, 377

Lactuca sativa **369**, 548

Lactuca serriola 369, 372, 373, 374, 375, 377

Lactuca virosa 369, 373, 374, 376, 377

Lens culinaris 585

Ligustrum vulgare 313

Lilium 757

Linum usitatissimum **383**

Lolium × *boucheanum* **659**

Lolium multiflorum 292, 298, **659**, 730

Lolium perenne **659**

Lonicera 781

Lotus corniculatus 282

Lupinus 682

Lycopersicon 704

Lycopersicon cheesmanii 698, 701, 702

Lycopersicon chilense 702

Lycopersicon chmielewskii 701, 702, 707

Lycopersicon esculentum 553, 618, **691**

Lycopersicon hirsutum 696, 702, 707

Lycopersicon pennellii 702

Lycopersicon peruvianum 699, 703

Lycopersicon pimpinellifolium 691, 694, 700, 701, 703

Malus 653

Malus baccata 621

Malus dasyphylla 621

Malus domestica 580, **621**

Malus floribunda 621, 630

Malus pumila 621, 628

Malus robusta 630

Malus sieversii 621

Malus sylvestris 621

Malus zumi 621, 630

Medicago falcata 399, 403, 406

Medicago sativa 282, 292, **397**, 674, 730

Medicago truncatula 309, 405, 406

Medicago × *varia* 403

Mespilus germanica 656

Musa acuminata **97**

Musa balbisiana **97**

Musa schizocarpa 108

Musa textilis 108

Muscadinia rotundifolia 762, 776

Napo-Raphanus 265

Narcissus 757

Nicotiana tabacum 579

Olea europaea 313

Pastinaca sativa 183

Petroselinum crispum 544

- Phaseolus coccineus* 336, 338, 343
Phaseolus vulgaris **335**, 594
Phleum pratense 730
Pinus 563
Pinus pinaster **557**
Pisum fulvum 586
Pisum sativum **585**, 588, 682
Populus 533
Populus alba 533, 535
Populus deltoides 533, 534, 535, 537, 539
Populus euramericana 534
Populus lasiocarpa 538
Populus nigra 533, 534, 535, 537, 539
Populus tremula 533, 535
Populus trichocarpa 535, 537, 539
Potentilla 327
Prunus **639**, 640
Prunus armeniaca **61**, 639, 641
Prunus avium **451**, 579, 639, 641, 643, 644
Prunus besseyi 645
Prunus canescens 644
Prunus cerasifera 61, 639, 643, 647
Prunus cerasus 451, 643, 644
Prunus communis 571, 579
Prunus × *dasycarpa* 61, 639
Prunus davidiana 527, 529, 643, 645
Prunus domestica 641, 642, 643, 647
Prunus dulcis 639
Prunus ferganensis 527
Prunus mahaleb 641, 643, 644
Prunus persica 457, **515**, 639, 643, 644
Prunus pseudocerasus 579
Prunus pyrifolia 578
Prunus salicina 643
Prunus sargentii 455
Prunus serotina 452, 455
Prunus spinosa 641, 643, 647
Psamma arenaria 557
Pyracantha **653**
Pyracantha coccinea 653, 654
Pyracantha crenulata 653
Pyracantha moretti 654
Pyronia veitchii 581
Pyrus 572, 581, 653
Pyrus communis **571**
Pyrus pyrifolia 572, 582

Quercus 557

Raphanus raphanistrum 270
Raphanus sativus 244, 246, 265, 266
Ribes dikuscha 202
Ribes divaricatum 199
Ribes hudsonianum 202

Ribes nigrum **199**
Ribes niveum 199
Ribes pauciflorum 202
Ribes petiolare 202

Saccharum officinarum 116
Secale cereale 149, 592, 737
Solanum 605, 606
Solanum andigenum 613
Solanum brevidens 614
Solanum bulbocastanum 614, 615
Solanum demissum 613
Solanum phureja 605, 615
Solanum stenotomum 605
Solanum stoloniferum 613
Solanum tuberosum **605**
Solanum vernei 613
Sorbus 656
Sorghum bicolor 425
Spinacia oleracea 117, 377
Synapis arvensis 270
Syringa vulgaris 313

Thinopyrum elongatum 149
Thinopyrum intermedium 149
Trifolium pratense 660, **729**
Trifolium repens 282, 292, 660, 674, 733
Tripsacum 426
Tripsacum dactyloides 428
× *Triticosecale* 588, **737**
Triticum aestivum 137, 496, 585, 617, 722, 737
Triticum dicoccoides 148
Triticum dicoccum 137
Triticum durum 137, 738, 741
Triticum monococcum 137, 148
Triticum timopheevi 142, 149, 150, 743
Triticum urartu 137
Tulipa **749**
Tulipa eichleri 754, 757
Tulipa fosteriana 751, 752, 754, 755, 756, 757
Tulipa gesneriana 749, 750, 752, 754, 755, 756
Tulipa greigii 752, 754, 755, 756
Tulipa kaufmanniana 752, 754, 755, 756, 757
Tulipa praestans 757

Umbellularia californica 271

Viburnum 781
Vicia faba **301**, 303, 585, 682
Vicia hyaeniscyamus 308
Vicia narbonensis 308
Vicia sativa 498
Vigna radiata 679
Vigna unguiculata 335, 338

Vitis aestivalis 761

Vitis amurensis 762

Vitis berlandieri 761, 767, 768, 771, 772

Vitis coignetiae 762

Vitis labrusca 761, 765, 771, 772

Vitis riparia 760, 761, 765, 767,
768, 771, 772

Vitis rotundifolia 761, 762, 772, 776, 777

Vitis rupestris 760, 761, 767, 768, 771, 772

Vitis vinifera **759**, 767, 768, 771, 772

Weigela **781**

Weigela coraensis 781, 782

Weigela floribunda 781, 782

Weigela florida 781, 782

Weigela hortensis 781

Weigela japonica 781

Weigela praecox 781

Zea mays 221, 283, 335, **409**, 617, 679, 718

Index des noms des micro-organismes et déprédateurs*

- Agrobacterium tumefaciens* 91, 108, 130, 149, 271, 378, 429, 489, 537, 642, 645, 685, 775
Alternaria 249
Alternaria alternata 578
Alternaria brassicicola 244
Alternaria dauci 188, 191, 226
Alternaria porri 488
Anisogramma anomala 463, 464, 466
Aphanomyces euteiches 302, 309, 586, 600
Aphis gossypii 440, 441, 442
Aphis grossulariae 204
Apion trifolii 731
Armillaria mellea 642, 645
Armillaria obscura 566
Artichoke latent virus 77
Ascochyta fabae 307, 310
Ascochyta linicola 387
Ascochyta pisi 591, 596, 601
Aspergillus flavus 476
- Bacillus amyloliquefaciens* 271, 429
Bacillus thuringiensis 108, 174, 327, 429, 430, 474, 537, 616, 706
Bacteria like organism 131, 328
Balaninus nucum 464
Banana bunchy top virus 108
Barley mild mosaic virus 506
Barley yellow dwarf virus 149, 506, 668
Barley yellow mosaic virus 506
Bean yellow mosaic virus 597
Beet necrotic yellow vein virus 124
Blumeria graminis 146, 505, 746
Blumeriella jipii 454
- Botrytis cinerea* 326, 393, 394, 715, 761, 775
Botrytis fabae 305, 310
Botrytis squamosa 489, 491
Botrytis tulipae 756
Bremia lactucae 76, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 380
Brenneria nigrifluens 476
Broadbean wilt virus 77
- Cacopsylla pyri* 573, 577, 580
Carbuncularia xylarioides 172
Cauliflower mosaic virus 245
Cecidophyopsis ribis 203, 204
Cercospora 125
Cercospora beticola 124
Cercospora carotae 191
Chalara elegans 387
Cherry leaf roll virus 472, 473
Chilli veinal mottle virus 549
Cirulifer tenellus 125
Cladosporium fulvum 699, 707
Clavibacter michiganense 702, 703
Claviceps purpurea 155
Coffee berry disease 167, 171
Colletotrichum acutatum 326, 328, 330
Colletotrichum gloeosporioides 351, 352, 354
Colletotrichum kahawae 171
Colletotrichum lindemuthianum 341
Colletotrichum trifolii 401
Corticium fuciforme 667
Corynebacterium michiganense 702, 703
Corynespora cassicola 352, 354
Cryptomyzus ribis 204

* cités dans la 2^e partie de l'ouvrage.

Cucumber mosaic virus 380, 442, 548, 707
Cucurbit aphid-borne yellows virus 446
Curly top 116, 119, 125, 127
Cydia molesta 529
Cydia pomonella 629
Cylindrosporium concentricum 264, 273

Dactylophaera vitifolii 760
Danaus plexippus 430
Delia radicum 248
Diabrotica virgifera 421
Diaporthe helianthi 718
Dickeya dianthicola 215
Didymella bryoniae 440
Didymella lycopersici 696, 702
Dioryctria spendidella 566
Ditylenchus dipsaci 401, 732
Dysaphis plantaginea 629

Eriophyes avellanae 464
Eriosoma lanigerum 629
Erwinia amylovora 577, 579, 629, 633, 655, 656
Erwinia carotovora 215, 226, 248, 249, 614
Erwinia chrysanthemi 215
Erysiphe cichoracearum 226, 441, 442
Erysiphe graminis 146, 505, 746
Erysiphe heraclei 191
Erysiphe polygone 597
Erysiphe trifolii 731, 732
Escherichia coli 429
European stone fruit yellows 641
Eutypa lata 777

Fulvia fulva 702, 703, 707
Fusarium 155, 305, 310, 427, 509, 731, 746
Fusarium graminearum 427
Fusarium moniliforme 93, 427
Fusarium oxysporum 93, 101, 105, 240, 389, 439, 440, 441, 442, 447, 488, 597, 601, 695, 696, 698, 699, 702, 703, 707, 756
Fusarium solani 696
Fusarium xylarioides 172

Gibberella xylarioides 172
Gibberella zeae 414
Globodera pallida 613, 615
Globodera rostochiensis 612
Gloeosporium ribis 203
Grapevine leafroll associated virus 762
Grapevine fanleaf virus 762, 774, 777

Helicoverpa zea 706

Heliothis virescens 706
Helminthosporium dictyoides 671
Helminthosporium gramineum 510
Helminthosporium maydis 422
Helminthosporium siccans 671
Helminthosporium turcicum 421
Hemileia vastatrix 171
Heterodera avenae 144
Heterodera carotae 194
Heterodera schachtii 124, 133
Hypothenemus hampei 179

Lactobacillus 234
Leptinotarsa decemlineata 606, 616
Leptosphaeria maculans 264
Lettuce big vein virus 380
Lettuce mosaic virus 372
Leucoptera coffeina 179
Leucoptera meyrickii 179
Leveillula taurica 81
Liriomyza 699

Mamestra brassicae 248
Marssonina brunnea 535, 536
Mastigospirium rubicosum 285
Matsucoccus feytaudi 566
Melampsora 539
Melampsora larici-populina 535, 536, 538, 539
Melampsora lini 390
Melampsora medusae 538
Melampsora pinitorcae 566
Meloidogyne 171, 194, 447, 549, 553, 641, 645, 647, 650, 695, 696, 698, 699, 703
Meloidogyne incognita 643
Meloidogyne javanica 643
Microcyclus ulei 352, 354, 355, 356
Monilinia fructicola 650
Monilinia laxa 529
Muskmelon necrotic spot virus 442
Mycena citricolor 178
Mycosphaerella brassicicola 237, 247, 249
Mycosphaerella eumusa 106
Mycosphaerella fijiensis 105
Mycosphaerella musicola 106
Mycosphaerella pinodes 595, 596, 600
Myzus persicae 380, 527, 616, 642

Nasonovia ribisnigri 373, 376, 377
Nectria galligena 632
Neotyphodium coenophialum 297
Neotyphodium lolii 672

Ochrobactrum anthropi 130, 271, 429

- Oidium lini* 390, 393
Oidium neolycopersici 702
Onion yellow dwarf virus 489
Ostrinia nubilalis 421, 428

Pea common mosaic virus 597
Pea seed-borne mosaic virus 598
Pectobacterium carotovorum 215, 226, 248
Pectobacterium chrysanthemi 215
Pepper mild mottle virus 548
Pepper vein mottle virus 549
Peronospora destructor 488
Peronospora parasitica 247, 249
Peronospora pisi 597
Phoma lingam 259, 264, 267, 273, 276
Phoma macdonaldii 724
Phoma medicaginis 596
Phoma terrestris 488
Phomopsis 715, 716, 717, 720, 721, 723, 726
Phomopsis helianthi 718
Phthorimaea operculella 616
Phylloxera vastatrix 760
Phytophthora 645
Phytophthora cactorum 325, 328, 627, 633
Phytophthora capsici 546, 549, 552, 554
Phytophthora cryptogea 209, 215
Phytophthora fragariae 328, 330
Phytophthora infestans 606, 612
Pieris brassicae 248
Plasmodiophora brassicae 247, 249, 273
Plasmopara halstedii 719
Plasmopara viticola 761, 776
Plum pox virus 65, 640
Plutella xylostella 248
Podosphaera leucotricha 629, 632
Polymyxa betae 124
Polymyxa graminis 506
Polyspora lini 391, 392, 393, 394
Potato leafroll virus 614
Potato virus A 612
Potato virus M 612
Potato virus S 612
Potato virus X 612
Potato virus Y 549, 612, 707
Pratylenchus 171
Pseudocercospora capsellae 264
Pseudocercospora herpotrichoides 146
Pseudomonas 642, 645, 650
Pseudomonas chloraphis 705
Pseudomonas cichorii 380
Pseudomonas solanacearum 553, 694, 699
Pseudomonas syringae 65, 249, 342, 446, 457, 597, 645, 703, 707
Pseudomonas tomato 699

Pseudomonas viridiflava 65
Pseudoperonospora cubensis 440, 447
Pseudopeziza ribis 203
Psila rosae 194
Puccinia coronata 294, 666
Puccinia glumarum 285
Puccinia graminis 146, 285, 294, 666
Puccinia hordei 505, 509
Puccinia striiformis 146, 746
Puccinia triticina 146, 746
Pyrenochaeta lycopersici 696, 702
Pyrenophora teres 506
Pythium sulcatum 191, 194
Pythium violae 191, 194

Radopholus similis 106
Ralstonia solanacearum 553, 694, 699, 703
Rhizobium leguminosarum 302, 586, 729
Rhizoctonia 380
Rhizoctonia solani 81, 124, 133, 226
Rhizoctonia violacea 131, 731
Rhynchosporium secalis 509
Rye-grass mosaic virus 668

Sagonospora nodorum 146, 148
Scaphoideus titanus 777
Sclerotinia 734
Sclerotinia minor 380
Sclerotinia sclerotiorum 273, 715, 719, 722, 723, 724, 726
Sclerotinia trifoliorum 729, 732
Sclerotium cepivorum 491
Scolecotricum graminis 285
Septoria linicola 392
Septoria tritici 146
Sesamia nonagrioides 421
Sinorhizobium meliloti 397
Sphaerellotheca reiliana 421
Sphaerotheca fuliginea 439, 441, 442
Sphaerotheca macularis 326
Sphaerotheca mors-uvae 202
Sphaerotheca pannosa 527, 529
Spilocaea pyracanthae 655
Spodoptera exigua 489
Squash mosaic virus 445
Stemphylium 703, 707
Stemphylium vesicarium 93
Streptomyces hygrosopicus 429, 684
Streptomyces scabies 612
Streptomyces viridochromogenes 130, 270, 271, 429, 684
Synchytrium endobioticum 612

Taphrina deformans 527, 529

Thielaviopsis basicola 226, 387

Thrips tabaci 491

Tobacco mosaic virus 548, 699

Tomato spotted wilt virus 548, 699

Tomato yellow leaf-curl virus 699

Trialeurodes vaporariorum 699

Trichogramma brassicae 421

Tulip breaking virus 756

Turnip mosaic virus 245

Uncinula necator 760, 776

Urocystis cepulae 489

Uromyces fabae 310

Ustilago nuda 510

Venturia inaequalis 629, 632

Venturia populina 536

Venturia pyrina 577

Verticillium albo-atrum 401

Verticillium dahliae 325, 328, 549, 696, 698, 703, 707

Watermelon mosaic virus 445, 446

Wheat streak mosaic virus 146

Xanthomonas 491

Xanthomonas arboricola 529, 640, 650

Xanthomonas campestris 247, 249, 380, 473, 475, 663, 664, 667

Xanthomonas fragariae 328

Xanthomonas phaseoli 342

Xiphinema index 772, 777

Xylella fastidiosa 775

Yellow mosaic virus 146

Zucchini yellow mosaic virus 442

Impression d'après documents fournis

bialec, nancy, (France)

Dépôt légal n° 64631 - juin 2006

Les méthodes utilisées en amélioration des plantes ainsi que les critères de sélection évoluent très rapidement. Cet ouvrage, clair et pédagogique, offre à la fois un historique et un bilan sur les acquis en la matière. Les bases de la génétique et les modes de reproduction des espèces végétales sont tout d'abord rappelés comme éléments nécessaires à la compréhension des principes et méthodes de l'amélioration des plantes.

Chaque plante cultivée est ensuite présentée sous forme de fiche construite sur un même plan : synthèse sur l'histoire de l'espèce et les innovations marquantes en matière de création variétale (les principales étapes de l'amélioration génétique, les perspectives à envisager, l'état de données sur l'inscription et la protection des variétés), avec des illustrations de la plante entière et des produits de la récolte.

Classées par ordre alphabétique, ces fiches permettent au lecteur d'accéder facilement à l'information sur les diverses plantes cultivées présentées : quatre céréales, six plantes oléo-protéagineuses, trois industrielles, trois forestières, cinq fourragères, huit fruitières, douze légumières, cinq ornementales, trois exemples d'espèces cultivées en milieu tropical et la vigne.

Fruit de la consultation et de la collaboration d'environ deux-cent-trente spécialistes du secteur public et du secteur privé, cet ouvrage est destiné aux étudiants, enseignants, professionnels des semences et à toute personne qui s'intéresse à l'amélioration des plantes.

Claire Doré, directeur de recherche au département de génétique et d'amélioration des plantes de l'Inra, est spécialiste de la culture *in vitro* de cellules végétales. Par ses travaux, elle a contribué à l'innovation variétale de plusieurs espèces légumières. Actuellement, C. Doré est chargée de mission pour la conservation du patrimoine des espèces qui ne font plus l'objet de programmes de recherche dans ce département.

Fabrice Varoquaux, maître de conférence à l'université de Montpellier 2, enseigne notamment l'amélioration des plantes et les biotechnologies végétales. Ses travaux visent à introduire des caractères d'intérêt agronomique dans des espèces cultivées par des méthodes de biologie moléculaire telles que la transgénèse ou le marquage moléculaire.

En couverture : Essai de variétés de blé tendre avec un champ de blé en arrière-plan, cliché C. Doré, Inra ; Pin maritime, abricots, maïs, clichés A. Raffin, A. Jaubert, J. Weber, Inra.



www.quae.com

 **Cemagref**

 **Ifremer**

ISBN 2-7380-1215-9
ISSN (en cours)
Réf. 01533

Prix TTC : 72 €

9 782738 012159